



**David Esteves Guedes**

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

## **Análise Metrológica de Acabamento de Superfícies Aplicada a Componentes Mecânicos**

Dissertação para obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Rui Fernando dos Santos  
Pereira Martins, Professor Auxiliar, FCT-UNL  
Co-orientadora: Dr.<sup>a</sup> Maria Fernanda Leitão da Silva Saraiva,  
Instituto Português da Qualidade

Presidente: Professor Doutor António Manuel Flores Romão de  
Azevedo Gonçalves Coelho.

Vogais: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,  
Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins.



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro 2014**



Copyright ©, 2014, David Esteves Guedes, FCT/UNL, IPQ e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Com a presente Dissertação, concluo o meu sonho de infância. Esta representa o culminar de vários anos de imenso trabalho. O meu trajecto nem sempre foi percorrido por um caminho fácil, muito pelo contrário. Houve fases do meu percurso académico bastante penosas e onde por vezes tudo o que tinha sido atingido até então foi por diversas ocasiões colocado em causa. Contudo, o trabalho que aqui apresento é a prova viva de que com muito empenho, dedicação, persistência e força de vontade tudo é possível e alcançável, e que nunca devemos desistir dos nossos sonhos.

Como não poderia deixar de ser, em primeiro lugar um MUITO OBRIGADO à minha família, em especial aos meus pais, Luísa e Henrique por todo o apoio, dedicação, atenção, carinho, motivação e paciência que tiveram para comigo. À minha avó, Maria Carolina, e em especial ao meu avô, Alfredo Esteves, um muito obrigado não chega para agradecer tudo o que fizeram por mim. Fizeram de mim o homem que sou hoje, e por isso vos estou eternamente grato. À minha namorada, Tatiana Figueiredo, agradeço a paciência e carinho que sempre teve para mim, mesmo nos meus dias menos bons. Ao meu primo, Rui Almeida, agradeço todos os conselhos, críticas, revisões que fez não só da presente Dissertação, bem como de todo o percurso da minha vida. Obrigado, és como um irmão para mim.

Os meus agradecimentos para o meu Orientador, o Professor Doutor Rui Fernando dos Santos Pereira Martins, da FCT-UNL/DEMI, pela oportunidade de realização desta dissertação, pelo interesse do tema proposto que incluiu a realização de um estágio, bem como por toda a sua disponibilidade, sugestões, críticas, revisões e sobretudo pela cordialidade com que sempre me recebeu.

À minha Co-Orientadora, a Dr. <sup>a</sup> Maria Fernanda Leitão da Silva Saraiva, envio também os meus mais sinceros agradecimentos pela possibilidade de trabalho conjunto, onde através de todo o seu imenso conhecimento, da sua disponibilidade e boa vontade, me deu várias orientações não só a nível de trabalho, mas também pessoais, que bastante prezo e que me foram e serão bastante úteis.

Gostaria ainda de agradecer ao Instituto Português da Qualidade pela oportunidade de estágio que me foi concedida, e pelos meios que colocou ao meu dispor para a realização da minha Dissertação.

O meu agradecimento também para a Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, pela excelente formação académica que me proporcionou, bem como a todos os docentes que tive ao longo do decorrer do curso pelo contributo que me deram.

Por fim, mas não sem menos importância, aqui fica o registo do meu agradecimento a todos os meus colegas e também estagiários do IPQ, com os quais tive o prazer de trabalhar, conviver, e partilhar experiências diariamente. O meu obrigado pelo companheirismo, camaradagem e espírito de união ao Jaime Machado, Luís Sousa, André Tavares, Ana Lacerda e João Braz.



## Resumo

Uma das tarefas mais relevantes deste trabalho foi a análise dos resultados de medição obtidos sobre os padrões de rugosidade, que permitiu identificar tendências dos resultados de medição de parâmetros de rugosidade pré-definidos, em função das condições de medição (ex.: comprimento total de medição, inclinação, tipo de apalpador). O estudo de quanto um valor de inclinação diferente do definido como critério de aceitação, influencia o valor do parâmetro de rugosidade em avaliação, foi um outro objectivo. Os resultados contribuíram para uma melhor definição das condições a ter em consideração aquando da calibração de padrões de rugosidade, bem como para uma melhor reprodutibilidade dos resultados obtidos (exactidão de medição) e redução do balanço de incertezas.

Com a verificação e calibração *in situ* de um rugosímetro industrial, concluiu-se acerca da importância que a calibração tem nos equipamentos de medição de rugosidade (perfilómetros de contacto ou rugosímetros), através da avaliação da compatibilidade de resultados obtidos com um rugosímetro do Laboratório Nacional de Metrologia (LNM) e de um rugosímetro industrial.

Dos trabalhos efectuados, averiguou-se a importância das normas técnicas que constituem a base do serviço de calibração de padrões de rugosidade, bem como da calibração dos sistemas de medição dos rugosímetros, nos resultados de medição e controlo de qualidade das superfícies. A calibração deve ser efectuada periodicamente e antes de qualquer medição da superfície em análise, através da utilização de padrões de rugosidade calibrados para os parâmetros a controlar. Estes podem variar de superfície para superfície.

O trabalho desenvolvido no decurso da elaboração da Dissertação decorreu principalmente no Laboratório de Comprimento (LCO) do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (IPQ), em particular na área de trabalho do Laboratório correspondente à “Forma e Rugosidade”, em estreita colaboração com o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial (DEMI) da FCT/UNL. Simultaneamente, a verificação e a calibração de um rugosímetro industrial *in situ* foi possível graças à estreita colaboração existente entre a FCT/UNL-DEMI e o Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies (ICEMS). Posteriormente à calibração do rugosímetro, as rugosidades de superfícies típicas de componentes mecânicos, obtidos por diferentes processos de fabrico (fundição, polimento e corte por serra), foram medidas, encontrando-se dentro da gama expectável de rugosidades.

## Palavras-chave:

Metrologia, Calibração, Acabamentos de Superfícies, Rugosímetro, Padrões de rugosidade, Incerteza.





## Abstract

One of the main tasks of this work was the analysis of the measurement results obtained on roughness standards, which identified trends of measurement results of pre-defined roughness parameters, depending on the measurement conditions (eg.: total length of measurement, slope, type of probe). The study of how a value different from the slope defined as the acceptance criterion, influences the value of the roughness parameter in evaluation, was another target. Thus contributing to a better definition of necessary conditions to take into account when calibration standards roughness as well as for better reproducibility of results (measurement accuracy) and reduced balance uncertainties.

With the *in situ* calibration and verification of an industrial rugosimeter, it was concluded on the importance that the calibration has on the roughness measuring equipments (contact profilometer or Surface Roughness Tester), as well as on the compatibility of results obtained by a profilometer National Laboratory Metrology (LNM) and an industrial roughness.

From work carried out, we ascertained the importance of technical standards base of calibration standards roughness of service as well as the calibration of the measurement systems of Surface Roughness Tester, in the measurement results and quality control of surfaces. The calibration must be carried out periodically and before any measurement of the area under analysis, by using calibrated standards for surface roughness parameters to be controlled, as these may vary from surface to surface.

The work carried out during the preparation of the dissertation took place mainly in the Laboratory of Length (LCO) of the Department of Metrology of the Portuguese Institute for Quality (IPQ), particularly in the area of work of the Laboratory corresponding to "Form and roughness," in close cooperation with the Department of Mechanical and Industrial Engineering (DEMI) of FCT / UNL. Simultaneously, verification and calibration of an industrial Surface Roughness Tester *in situ* was possible thanks to the close cooperation existing between the FCT / UNL-DEMI and the Institute for Science and Engineering Materials and Surfaces (ICEMS). After the calibration of the Surface Roughness Tester, the roughness of typical surfaces of mechanical components, obtained by different manufacturing processes (casting, polishing and saw cutting) were measured, lying within the expected range of roughness.

## Keywords:

Metrology, Calibration, Surface Finishes, Surface Roughness Tester, Roughness Standards, Uncertainty.



# Índice

<b>1</b>	<b>Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1	Objectivos da Dissertação.....	2
1.2	Estrutura da Dissertação.....	3
<b>2</b>	<b>Enquadramento .....</b>	<b>5</b>
2.1	Evolução histórica da Metrologia no Mundo .....	5
2.2	Evolução histórica da Metrologia em Portugal.....	6
2.3	Metrologia .....	7
2.3.1	Rastreabilidade Metrológica.....	8
2.4	Instituto Português da Qualidade.....	9
2.5	Departamento de Metrologia .....	11
2.6	Laboratório de Comprimento .....	12
2.7	Sistema Internacional de Unidades .....	13
2.7.1	Metro .....	14
<b>3</b>	<b>Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição .....</b>	<b>17</b>
3.1	Incerteza de Medição.....	18
3.2	Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada..	19
3.2.1	Avaliação de Tipo A da Incerteza-Padrão .....	19
3.2.2	Avaliação de Tipo B da Incerteza-Padrão .....	20
3.2.2.1	Distribuição Normal .....	20
3.2.2.2	Distribuição Rectangular .....	21
3.2.2.3	Distribuição Triangular.....	22
3.2.3	Cálculo da Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída .....	22
3.2.4	Incerteza de Medição Expandida.....	23
3.2.5	Expressão da Incerteza de Medição em Certificados de Calibração .....	24
<b>4</b>	<b>Acabamentos de Superfícies.....</b>	<b>27</b>
4.1	Simbologia gráfica para indicação do acabamento de superfícies .....	32
4.1.1	Símbolo gráfico básico .....	32
4.1.2	Símbolos gráficos expandidos .....	32
4.1.3	Símbolo gráfico completo .....	33
4.1.4	Símbolo gráfico para “todas as superfícies em volta de um contorno da peça” ...	33

4.2	Composição do símbolo gráfico completo para os estados de superfície.....	34
4.2.1	Posição de requisitos complementares de acabamentos de superfície .....	34
4.3	Indicação dos parâmetros de acabamento de superfície.....	36
4.3.1	Indicação do comprimento de avaliação, <i>ln</i> .....	36
4.3.2	Indicação dos limites de tolerância.....	36
4.3.3	Indicação da banda de transmissão/comprimento amostral.....	37
4.3.4	Tipos de Tolerâncias: Unilateral ou Bilateral.....	38
4.3.4.1	Tolerância Unilateral de um parâmetro de superfície.....	38
4.3.4.2	Tolerância Bilateral de um parâmetro de superfície .....	39
4.4	Indicação do método de fabrico ou de informações relacionadas.....	39
4.5	Indicação das estrias de superfície .....	40
4.6	Indicação da sobre-espessura para maquinação/acabamento.....	42
4.7	Inscrição em desenhos e noutra documentação técnica de produtos.....	42
4.7.1	Posição e orientação do símbolo gráfico e sua anotação .....	42
4.7.1.1	Superfícies cilíndricas ou prismáticas .....	44
4.7.1.2	Requisitos comuns em múltiplas superfícies .....	46
4.7.2	Indicação de dois ou mais métodos de fabrico .....	47
<b>5</b>	<b>Parâmetros de Rugosidade .....</b>	<b>49</b>
5.1	Termos gerais .....	49
5.2	Parâmetros de Amplitude.....	52
5.3	Parâmetros de Espaçamento.....	57
5.4	Parâmetros Híbridos.....	57
5.5	Parâmetros de Rugosidade normalmente utilizados para identificar o padrão de medição (valor nominal).....	58
5.6	Padrões de Medição .....	59
<b>6</b>	<b>Métodos Experimentais.....</b>	<b>67</b>
6.1	Constituição e características de um Rugosímetro .....	68
6.1.1	Componentes do Rugosímetro.....	68
6.2	Calibração de Padrões de Rugosidade Tipo C e D.....	70
6.2.1	Condições de referência.....	70
6.2.2	Modo operativo .....	70
6.2.2.1	Medição dos parâmetros do perfil .....	70

6.2.2.2	Procedimento para perfis de rugosidade não periódicos .....	71
6.2.2.3	Procedimento para perfis de rugosidade periódicos .....	72
6.2.3	Descrição do modo operativo.....	74
6.2.4	Calibração de rugosímetros .....	75
<b>7</b>	<b>Curvas de tendência em medições de rugosidade superficial.....</b>	<b>77</b>
7.1	Método para aquisição dos dados (Processo de medição) .....	77
7.2	Balanço de incerteza dos valores de medição .....	87
7.3	Avaliação da compatibilidade metrológica de resultados.....	93
<b>8</b>	<b>Verificação e calibração “in situ” de um rugosímetro industrial .....</b>	<b>97</b>
8.1	Calibração de um rugosímetro industrial .....	97
8.1.1	Preparação para a calibração .....	98
8.1.2	Procedimento de calibração.....	99
8.1.3	Resultados obtidos antes e após a calibração do rugosímetro industrial .....	101
8.2	Análise Metrológica de acabamentos superficiais.....	102
8.3	Resultados de medição .....	102
8.3.1	Superfície obtida por corte por serra .....	104
8.3.2	Superfície obtida por fundição .....	104
8.3.3	Superfície obtida por polimento .....	105
8.3.4	Superfície obtida por corte por serra (IPQ) .....	105
<b>9</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>107</b>
	<b>Bibliografia .....</b>	<b>109</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>111</b>
	Anexo I - Exemplos de aplicação da norma ISO 1302:2002.....	113
	Anexo II – Indicações mínimas para um controlo não ambíguo de funções da superfície.....	119
	Anexo III - Relatório de Ensaios .....	121



## Índice Figuras

Figura 2.1 – Exemplos de medidas-padrão .....	5
Figura 2.2 – a) Marco-padrão Manuelino; b) Medida de D. Sebastião para volumes secos; c) Padrão de volume, de líquidos, da colecção da reforma de D. Sebastião.....	6
Figura 2.3 - Áreas da Metrologia.....	7
Figura 2.4 – O BIPM: definição das unidades. O IPQ: realização das unidades. ....	8
Figura 2.5 - Foto do Laboratório de Comprimento – Forma e Rugosidade. ....	12
Figura 2.6 – Barra de platina-irídio utilizada como protótipo do metro.. ....	15
Figura 3.1 - Distribuição Normal.....	21
Figura 3.2 - Distribuição Rectangular.....	22
Figura 3.3 - Distribuição Triangular.....	22
Figura 4.1 - Rugosidade e ondulação numa superfície.....	27
Figura 4.2 - Características de Superfície e terminologia.....	27
Figura 4.3 - Fases da fadiga.....	29
Figura 4.4 - Efeito do Estado Superficial .....	29
Figura 4.5 – Exemplos de acabamentos superficiais.....	30
Figura 4.6 – Perfil real (P) e perfil nominal (N) de uma superfície.....	30
Figura 4.7 – Tipos de desvios: a) desvio geométrico, b) ondulação, c) rugosidade, d) composição dos desvios (perfil real).....	31
Figura 4.8 - Símbolo gráfico básico para acabamento superficial. ....	32
Figura 4.9 – Símbolos gráficos expandidos: a) Requerida a remoção de material, b) Proibida a remoção de material.....	32
Figura 4.10 – Símbolo gráfico completo: a) Permitido qualquer processo de fabrico; b) Requerida a remoção de material; c) Proibida a remoção de material.....	33
Figura 4.11 - Requisito de acabamento de superfície para todas as seis superfícies representadas pelo contorno da peça.....	33
Figura 4.12 - Forma geral do símbolo para a indicação do grau de acabamento superficial. ....	34
Figura 4.13 - Forma geral do símbolo para a indicação do grau de acabamento superficial.....	34
Figura 4.14 - Indicação do parâmetro onde se aplica a regra dos 16% (com banda de transmissão, por omissão). ....	37
Figura 4.15 - Indicação do parâmetro onde se aplica a regra do valor máximo (com banda de transmissão, por omissão). ....	37
Figura 4.16 - Indicação da banda de transmissão conjuntamente com os requisitos de acabamentos superficiais. ....	38
Figura 4.17 - Especificação bilateral da superfície.....	39

Figura 4.18 - Indicação do processo de trabalho mecânico (ex.: torneamento) e requisito para rugosidade da superfície resultante.....	40
Figura 4.19 - Indicação do requisito de rugosidade e revestimento. ....	40
Figura 4.20 - Direcção do padrão das estrias de superfície indicado perpendicularmente ao plano de projecções que contém o requisito de acabamento de superfícies.....	40
Figura 4.21 - Indicação de requisitos de acabamento superficial para peça a "final" (inclui um requisito para 3 mm de tolerância admissível/sobre-espessura para todas as superfícies).....	42
Figura 4.22 - Direcção de leitura dos requisitos de acabamentos de superfície.. ....	43
Figura 4.23 - Requisitos de acabamentos de superfície na linha de contorno representando a superfície. ....	43
Figura 4.24 - Uso alternativo das linhas de referência e linhas de chamada. ....	43
Figura 4.25 - Requisito de acabamento de superfície – cota de elemento. ....	44
Figura 4.26 - Requisitos de acabamentos de superfície sobre linhas de chamada.....	44
Figura 4.27 - Requisitos de acabamentos de superfície - superfícies cilíndricas e prismáticas.....	45
Figura 4.28 - Indicação simplificada - Maioria das superfícies com o mesmo requisito de acabamento de superfície.....	45
Figura 4.29 - Indicação simplificada - Maioria das superfícies com o mesmo requisito de acabamento de superfície.....	46
Figura 4.30 – Indicação de referência em caso de espaço limitado para inscrição no desenho técnico.....	46
Figura 4.31 - Indicação simplificada de requisitos de acabamentos de superfície - Processo de fabrico não especificado.....	47
Figura 4.32 - Indicação simplificada de requisitos de acabamentos de superfície - Remoção de material requerida.....	47
Figura 4.33 - Indicação simplificada de requisitos de acabamentos de superfície - Remoção de material proibida.. ....	47
Figura 4.34 - Indicação de requisitos de acabamento de superfície antes e após tratamento (revestimento neste caso).....	47
Figura 5.1 - Transmissão característica de perfis de rugosidade e ondulação. ....	50
Figura 5.2 - Elemento do perfil.....	51
Figura 5.3 - Perfil da superfície. ....	51
Figura 5.4 - Comprimento amostral e Comprimento de avaliação.....	52
Figura 5.5 - Altura máxima dos picos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade).. ....	53
Figura 5.6 - Profundidade máxima dos vales do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade). ....	53
Figura 5.7 - Altura máxima do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade). ....	54
Figura 5.8 - Parâmetros $R_t$ e $R_z$ .....	54
Figura 5.9 - Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade).. ....	55



Figura 5.10 - Parâmetros de rugosidade $Ra$ e $Rq$ .....	56
Figura 5.11 - Largura dos elementos do perfil.....	57
Figura 5.12 - Inclinações locais.....	57
Figura 5.13 - Parâmetro de amplitude, $Ra$ .....	58
Figura 5.14 - Padrão de Medição Tipo A1.....	60
Figura 5.15 - Padrão de Medição Tipo A2.....	61
Figura 5.16 - Padrão de Medição Tipo B2 (Padrão de sulcos sensíveis).....	61
Figura 5.17 - Padrão de Medição Tipo B2 (Padrão de sulcos insensíveis).....	62
Figura 5.18 - Padrão de Medição Tipo C1.....	62
Figura 5.19 - Padrão de Medição Tipo C2.....	63
Figura 5.20 - Padrão de Medição Tipo C3.....	63
Figura 5.21 - Padrão de Medição Tipo C4.....	63
Figura 5.22 - Padrão de Medição Tipo D1.....	64
Figura 5.23 - Padrão de Medição Tipo D2.....	64
Figura 5.24 - Padrão de Medição Tipo E2.....	65
Figura 6.1 – Rugosímetro do IPQ e respectivo sistema de medição.....	68
Figura 6.2 – Elementos constituintes do rugosímetro.....	69
Figura 6.3 – Padrão de rugosidade de referência de tipo A1, modelo PEN-10-1, da marca Mahr.....	70
Figura 6.4 – Linhas de traçagem sobre o padrão de rugosidade Tipo A (a)) e Sulco (b)).....	74
Figura 7.1 - Curva de tendência do parâmetro $Ra$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 17,5 mm$ .....	79
Figura 7.2 - Curva de tendência do parâmetro $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 17,5 mm$ .....	79
Figura 7.3 - Curva de tendência do parâmetro $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 17,5 mm$ .....	80
Figura 7.4 - Curva de tendência do parâmetro $Ra$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 5,6 mm$ .....	81
Figura 7.5 - Curva de tendência do parâmetro $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 5,6 mm$ .....	81
Figura 7.6 - Curva de tendência do parâmetro $Rt$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 5,6 mm$ .....	82
Figura 7.7 - Curva de tendência do parâmetro $Ra$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 2 \mu m$ , $lt = 17,5 mm$ .....	83
Figura 7.8 - Curva de tendência do parâmetro $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $rtip = 2 \mu m$ , $lt = 17,5 mm$ .....	84

Figura 7.9 - Curva de tendência do parâmetro $R_t$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ , $l_t = 17,5 \text{ mm}$ .	85
Figura 7.10 - Curva de tendência do parâmetro $R_a$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ , $l_t = 5,6 \text{ mm}$ .	86
Figura 7.11 - Curva de tendência do parâmetro $R_z$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ , $l_t = 5,6 \text{ mm}$ .	86
Figura 7.12 - Curva de tendência do parâmetro $R_t$ , utilizando o apalpador RFHTB-50, $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ , $l_t = 5,6 \text{ mm}$ .	87
Figura 8.1 - Padrão de rugosidade Tipo C, apalpador ( <i>stylus</i> ) e unidade de leitura do rugosímetro industrial. ....	97
Figura 8.2 – Calibração do rugosímetro industrial. Primeiro passo. ....	98
Figura 8.3 - Calibração do rugosímetro industrial. Segundo passo. ....	98
Figura 8.4 - Calibração do rugosímetro industrial. Terceiro passo. ....	99
Figura 8.5 - Calibração do rugosímetro industrial. Quarto passo: definição da inclinação. ....	99
Figura 8.6 – Procedimento de calibração do rugosímetro industrial. Primeiro passo. ....	100
Figura 8.7 - Procedimento de calibração do rugosímetro industrial. Segundo passo. ....	100
Figura 8.8 - Procedimento de calibração do rugosímetro industrial. Terceiro passo. ....	101
Figura 8.9 – Superfície obtida por corte por serra. ....	104
Figura 8.10 – Superfície obtida por fundição em molde de areia. ....	104
Figura 8.11 – Superfície obtida por polimento. ....	105
Figura II.0.1 - Elementos de controlo na indicação dos requisitos de acabamentos superficiais em desenhos de engenharia. ....	119

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - Unidades de base do SI .....	14
Tabela 3.1 - Factores de Expansão, $k$ , para Diferentes Números de Graus de Liberdade Efectivos $vef$ .....	24
Tabela 4.1 – Ordens de grandeza dos desvios geométricos. ....	31
Tabela 4.2 - Indicação das estrias de superfície. ....	41
Tabela 4.3 - Diferentes valores de rugosidade média consoante o processo de fabrico .....	48
Tabela 5.1 - Tipos e aplicações de Padrões de rugosidade. ....	60
Tabela 6.1 – Comprimentos amostrais de rugosidade para a medição de $Ra$ , $Rq$ , $Rsk$ , $Rku$ , $RAq$ e curvas e parâmetros relacionados para perfis não periódicos. ....	72
Tabela 6.2 - Comprimentos amostrais de rugosidade para a medição de $Rz$ , $Rv$ , $Rp$ , $Rc$ e $Rt$ e curvas e parâmetros relacionados para perfis não periódicos. ....	73
Tabela 6.3 - Comprimentos amostrais de rugosidade para a medição de parâmetros de rugosidade de perfis periódicos, e $RSm$ de perfis periódicos e não periódicos. ....	73
Tabela 7.1 –Reprodutibilidade para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ . ....	77
Tabela 7.2 – Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 17,5 mm$ . ....	78
Tabela 7.3 - Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ , $lt = 5,6 mm$ . ....	80
Tabela 7.4 – Reprodutibilidade para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 2 \mu m$ . ....	82
Tabela 7.5 - Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 2 \mu m$ , $lt = 17,5 mm$ . ....	83
Tabela 7.6 - Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 2 \mu m$ , $lt = 5,6 mm$ . ....	85
Tabela 7.7 - Repetibilidade. Exemplo para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ . ....	88
Tabela 7.8 - Reprodutibilidade. Exemplo para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ . ....	89
Tabela 7.9 – Ruído do sistema. Exemplo para o apalpador RFHTB-50, $rtip = 5 \mu m$ . ....	90
Tabela 7.10 – Balanço de Melhor Incerteza. ....	91
Tabela 7.11 – Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 5 \mu m$ e $lt = 17,5 mm$ . ....	92
Tabela 7.12 - Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 5 \mu m$ e $lt = 5,6 mm$ . ....	92
Tabela 7.13 - Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 2 \mu m$ e $lt = 17,5 mm$ . ....	92
Tabela 7.14 - Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 2 \mu m$ e $lt = 5,6 mm$ . ....	93

Tabela 7.15 – Valores de referência da calibração do padrão.....	94
Tabela 7.16 – Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 5\text{ }\mu\text{m}$ e $lt = 17,5\text{ mm}$ .....	94
Tabela 7.17 - Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 5\text{ }\mu\text{m}$ e $lt = 5,6\text{ mm}$ . ....	94
Tabela 7.18 - Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 2\text{ }\mu\text{m}$ e $lt = 17,5\text{ mm}$ .....	95
Tabela 7.19 - Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros $Ra$ , $Rz$ e $Rt$ , para apalpador com $rtip = 2\text{ }\mu\text{m}$ e $lt = 5,6\text{ mm}$ . ....	95
Tabela 8.1 – Valores dos parâmetros de rugosidade medidos antes e após a calibração do rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-201P (3 medições de rugosidade por linha, 4 linhas de medição).....	101
Tabela 8.2 – Resultados obtidos para o parâmetro $Rmax$ . Exemplo para a superfície obtida por polimento.....	103
Tabela 8.3 - Resultados para a superfície obtida por corte por serra.....	104
Tabela 8.4 - Resultados para a superfície obtida por fundição em molde de areia.....	104
Tabela 8.5 – Resultados para a superfície obtida por polimento.....	105
Tabela 8.6 - Resultados para a superfície obtida por corte por serra (IPQ).....	105
Tabela 8.7 – Evolução dos parâmetros $Ra$ e $Rmax$ em função de $lt$ , para a superfície obtida por corte por serra (IPQ). ....	106
Tabela I.0.1 – Exemplos de símbolos gráficos com indicação do acabamento de superfície .....	113
Tabela I.0.2 – Exemplos de símbolos gráficos contendo informação suplementar.....	114
Tabela I.0.3 – Exemplos de símbolos gráficos com indicação de requisitos de acabamentos de superfície.....	114

## Lista de Siglas e Acrónimos

AFM	Microscópios de força atómica
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CIPM	<i>Comité International des Poids et Mesures</i>
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial
DMET	Departamento de Metrologia
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
GPS	<i>Geometrical Product Specification</i>
GUM	<i>Guide to the expression of Uncertainty in Measurement</i>
ICEMS	Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies
IPQ	Instituto Português da Qualidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCO	Laboratório de Comprimento
LNM	Laboratório Nacional de Metrologia
NMI	Institutos Nacionais de Metrologia
N	Perfil Nominal
NP	Norma Portuguesa
ONS	Organismos de Normalização Sectorial
P	Desvios Repetitivos de um Perfil
SI	Sistema Internacional de Unidades
SPM	Microscópios de Varrimento Laser



## Simbologia

$a$	Valor da Incerteza Apresentada
$a_+$	Limite Superior
$a_-$	Limite Inferior
$C$	Factor de Calibração
$C1$	Factor de Correção
$c_i$	Coefficiente de Sensibilidade
$c_0$	Velocidade da luz no vazio
$\varepsilon$	Erro de Medição
$En$	Erro Normalizado
$f$	Função Modelo
$f_1$	Frequência
$k$	Factor de Expansão
$l$	Trajecto percorrido, no vazio, por uma onda plana electromagnética
$ln$	Comprimento de Avaliação
$lr$	Comprimento Amostral
$Lt$	Comprimento Total de Medição
$n$	Número de Observações Independentes
$P$	Perfil Primário
$q_j$	Observações ( $j = 1, 2, 3 \dots, n$ )
$\bar{q}$	Média Aritmética das Observações
$R$	Rugosidade

$Ra$	Desvio Médio Aritmético do Perfil Avaliado
$Rc$	Altura Média dos Elementos do Perfil
$Rku$	Curtose (“ <i>Kurtosis</i> ”) do Perfil Avaliado
$Rmax$	Rugosidade Máxima
$Rp$	Altura Máxima dos Picos do Perfil
$Rq$	Desvio Quadrático Médio do Perfil Avaliado
$Rsk$	Assimetria do Perfil Avaliado
$RSm$	Largura Média dos Elementos do Perfil
$Rt$	Altura Total do Perfil
$Rv$	Profundidade Máxima dos Vales do Perfil
$Rz$	Altura Máxima do Perfil
$R\Delta q$	Declive Quadrático Médio do Perfil Avaliado
$r_{tip}$	Raio do Apalpador (“ <i>stylus</i> ”)
$s$	Desvio-Padrão
$s(q)$	Desvio-Padrão Experimental das Observações
$s^2(q)$	Variância Experimental das Observações
$t$	Tempo
$U$	Incerteza de Medição Expandida
$u_c$	Incerteza Combinada
$U_{ref}$	Incerteza de Medição Expandida de Referência
$u(x_i)$	Incerteza-Padrão
$u(y)$	Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída



$v_{ef}$	Número de Graus de Liberdade Efectivos
VM	Valor Medido
VR	Valor de Referência
$X_i$	Grandeza de Entrada
$x_i$	Estimativa da Grandeza de Entrada
$x_{ref}$	Valor de Referência
$X_s$	Elementos do Perfil
$Y$	Grandeza de Saída
$y$	Estimativa da Grandeza de Saída
$W$	Ondulação
$Z(x)$	Valor da Ordenada
$Z_p$	Altura do Pico do Perfil
$Z_t$	Altura do Elemento do Perfil
$Z_v$	Altura do Vale do Perfil
$\lambda_1$	Comprimento de onda no vazio
$\frac{dZ}{dx}$	Declives Locais
$\mu$	Média Aritmética dos Valores Avaliados para o Parâmetro de Rugosidade do Perfil Seleccionado
$\sigma$	Desvio-Padrão dos Valores Avaliados para o Parâmetro de Rugosidade do Perfil Seleccionado
$\lambda$	Filtro do Perfil



# 1 Introdução

A metrologia, *ciência da medição e suas aplicações*, engloba todos os aspectos teóricos e práticos da medição, qualquer que seja a incerteza de medição e o campo de aplicação, sendo aplicável a qualquer grandeza determinável [1]. A medição é um processo de extrema importância em diversas áreas de actividade, uma vez que através da metrologia se garante o nível de qualidade pretendido para a concepção, fabrico e utilização de um produto ou serviço [2].

Foi efectuada a análise das normas técnicas de base do serviço de calibração de padrões de rugosidade, bem como das normas NP EN ISO 9001:2008 (Sistemas de gestão da qualidade) e NP EN ISO/IEC 17025:2005 (Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração), referenciais da Qualidade implementadas no Laboratório de Comprimento (LCO), e segundo as quais são prestados os serviços de calibração.

A superfície dos componentes mecânicos é um factor de extrema importância para o correcto funcionamento dos sistemas (máquinas). Nesse sentido, o controlo da qualidade da produção das superfícies dos materiais tem de ter em conta, entre outros, o processo de fabrico e a função dessa superfície através do controlo da qualidade do seu acabamento superficial.

O rigor e a exactidão do acabamento superficial de qualquer peça mecânica são cruciais para que tenha o desempenho para o qual foi projectada e concebida. As superfícies maquinadas apresentam sempre desvios relativamente à superfície ideal ou teórica, nunca se podendo portanto considerar uma superfície *como perfeita* em termos absolutos. Torna-se assim fundamental o controlo e registo do seu acabamento superficial, através da utilização de equipamentos de medição de elevada precisão (rugosímetros), de acordo com as normas estabelecidas, de modo a evitar erros decorrentes quer do próprio processo de fabrico da peça, quer na utilização da peça, garantindo portanto deste modo o nível de qualidade pretendido.

A exactidão dos acabamentos superficiais influencia factores tais como a tolerância dimensional, a resistência à corrosão e à fadiga, o escoamento de fluidos, a lubrificação e a transmissão de calor nas peças, para além do custo de fabrico e de verificação dos componentes mecânicos produzidos. O controlo de qualidade das superfícies mecânicas utilizadas em Engenharia Mecânica constitui a forma de avaliação da relação entre o processo de fabrico e a função da superfície do material e pode ser conseguida através do controlo da textura da sua superfície. A realização de medições de repetibilidade e reprodutibilidade sobre peças mecânicas utilizando como referência os valores dos parâmetros de rugosidade, dos padrões de rugosidade, constitui um procedimento de controlo da qualidade das superfícies.

Pretende-se, com a presente dissertação apresentar a importância das normas técnicas, da análise metrológica dos acabamentos de superfície de componentes mecânicos produzidos por diferentes processos de fabrico, nomeadamente por polimento, corte por serra e fundição. É ainda objectivo do presente trabalho averiguar a importância que a calibração dos sistemas de medição dos rugosímetros, tem nos resultados de medição e no controlo da qualidade das superfícies.

## **1.1 Objectivos da Dissertação**

Esta dissertação tem como objectivo principal conhecer e aplicar as metodologias necessárias para realizar a análise metrológica de acabamentos superficiais. É também objectivo da presente dissertação, analisar o acabamento de superfície de componentes mecânicos, e de padrões de rugosidade, através das referidas metodologias.

Para tal, é necessária a utilização de equipamentos de medição (designados de rugosímetros) e de padrões de rugosidade calibrados. Com estes sistemas é possível fazer o estudo dos parâmetros de rugosidade das superfícies a analisar, para posteriormente ser determinado o grau de acabamento das diversas superfícies dos componentes mecânicos ou de outros sistemas.

Para a concretização destes objectivos foram realizadas as seguintes tarefas:

Tarefa A – Realização de pesquisa bibliográfica com o objectivo de sintetizar o estado-da-arte relativo ao tema da tese.

Tarefa B – Medição de padrões de rugosidade por perfilometria em condições de reprodutibilidade e análise dos resultados.

Tarefa C – Verificação e calibração *in situ* de um rugosímetro utilizado em laboratório.

Tarefa D – Definição, preparação e realização de diversas experiências com o objectivo de realizar a análise metrológica de acabamentos superficiais.

Tarefa E – Determinação do acabamento de superfície de diversas superfícies de componentes mecânicos.

Tarefa F – Síntese, análise e discussão dos resultados obtidos.

Tarefa G – Escrita da dissertação.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

A presente dissertação está dividida em 9 capítulos:

O capítulo 1, designado de *Introdução*, faz uma apresentação da dissertação e da relevância do tema em estudo, bem como a descrição das principais tarefas a realizar e a estrutura organizacional do documento.

O capítulo 2, denominado *Enquadramento*, dá a conhecer a evolução da Metrologia a nível nacional e internacional e as suas áreas de actividade e responsabilidade. Descreve ainda a missão e atribuições do Instituto Português da Qualidade, do Departamento de Metrologia e do Laboratório de Comprimento. Neste capítulo é feita também uma descrição do Sistema Internacional de Unidade com especial foco na unidade metro.

O capítulo 3, intitulado *Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição*, descreve os princípios para avaliação do erro de medição e a incerteza de medição expandida.

O capítulo 4, chamado *Acabamentos de Superfícies*, aborda os acabamentos superficiais e a sua importância, dando especial atenção à rugosidade. Analisa ainda a norma ISO 1302:2002, que contém toda a informação técnica relativa a rugosidade de superfície.

O capítulo 5, designado *Parâmetros de Rugosidade*, contém os principais parâmetros envolvidos no estudo da rugosidade superficial e quais os normalmente utilizados para identificar o padrão de medição.

O capítulo 6, denominados *Métodos Experimentais*, descreve o princípio de funcionamento, constituição e características do equipamento de medição rugosímetro. É feita ainda a descrição do modo operativo para a medição dos parâmetros do perfil a avaliar.

O capítulo 7, nomeado *Curvas de tendência em medições de rugosidade superficial*, contempla a realização de medições de padrões de rugosidade, de modo a identificar tendências dos resultados de medição de parâmetros de rugosidade pré-definidos em função das condições de medição, bem como o estudo de quanto um valor de inclinação diferente do definido como critério de aceitação influencia o valor do parâmetro de rugosidade em avaliação.

O capítulo 8, designado *Verificação e calibração “in situ” de um rugosímetro industrial*, dá a conhecer o processo subjacente à verificação e calibração de um rugosímetro industrial, de modo a concluir acerca da reprodutibilidade das medições e da importância da calibração do mesmo. São ainda verificadas superfícies mecânicas obtidas por diferentes processos de fabrico e cálculo das respectivas incertezas de medição expandidas.

Para finalizar, o capítulo 9 intitulado *Conclusões* apresenta a conclusão dos diversos pontos considerados essenciais da presente dissertação.



## 2 Enquadramento

### 2.1 Evolução histórica da Metrologia no Mundo

Desde os primórdios da humanidade, a padronização dos pesos e medidas tem sido uma meta do progresso social e económico. Contudo, até ao século XVII não existia um sistema unificado de medição. Os primeiros sistemas de pesos e medidas eram baseados na morfologia humana. Os nomes das unidades eram muitas vezes referidos a partes do corpo humano, tais como a polegada, o palmo, o pé, o cúbito, etc. Consequentemente, estas unidades de medida não foram consideradas como universais, variando portanto de cidade para cidade e consoante o objecto sujeito à medição [3].

Esta falha na existência de um sistema padronizado de medidas colocou um travão no comércio internacional e impediu o desenvolvimento da ciência a nível internacional, uma vez que deu origem a erros e fraudes nas transacções comerciais. Com a expansão do comércio e da indústria, houve uma necessidade crescente de harmonização dos pesos e medidas entre os países. Esta questão foi solucionada com a adopção de um padrão de medida (distância ou peso) por comparação com um padrão retirado da Natureza [3].

As unidades de medida primitivas eram consideradas referências universais, pois podiam ser verificadas por qualquer pessoa. Desta forma surgiram as medidas-padrão como a polegada, o palmo, o pé, a jarda, a braça, o passo, o palmo, o cúbito e o côvado, entre muitas outras (Figura 2.1) [4].

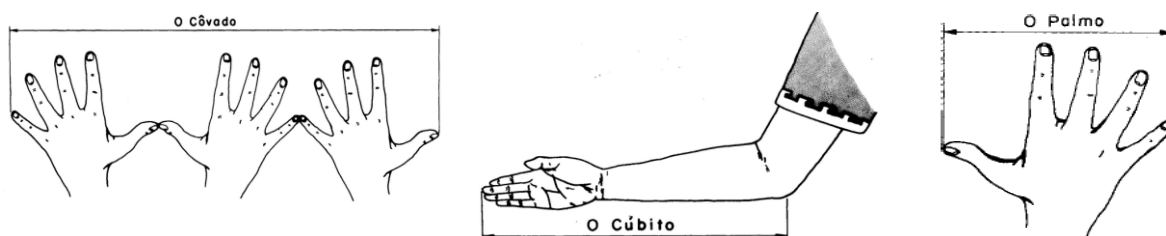


Figura 2.1 – Exemplos de medidas-padrão [4].

Para além das unidades-padrão, cujos valores reais variavam de acordo com as circunstâncias, muitas outras foram inventadas. Ao longo dos anos foram criadas várias unidades-padrão que tinham como principal objectivo a uniformização dos critérios nas trocas comerciais, até que se deu origem a um sistema coerente de unidades, que se pretendeu universal – o Sistema Internacional de Unidades – SI [2].

## 2.2 Evolução histórica da Metrologia em Portugal

Desde os primórdios da constituição de Portugal que os governantes manifestaram interesse pelos Pesos e Medidas, dada a sua importância para as transacções comerciais e para o desenvolvimento do país. Devido a esta razão, os Pesos e Medidas foram sempre de jurisdição real [2].

Os Padrões eram fundamentais para a determinação dos impostos sobre a produção e o comércio dos bens e mercadorias, sendo considerados, tal como a moeda, instrumentos de poder e de vassalagem. Com a consolidação do Estado, cedo se colocou a necessidade da uniformização dos Padrões. A mesma unidade de volume para cereais (por exemplo) devia ter o mesmo valor, qualquer que fosse o ponto do Estado em que se realizasse a troca comercial [2].

No período medieval, as grandezas consideradas mais relevantes no nosso país eram: o Comprimento, o Peso e o Volume.

O crescimento das trocas comerciais gerava a necessidade de definir sistemas de unidades com múltiplos e submúltiplos da unidade-padrão, surgindo assim:

- Os múltiplos (o arrátel, a arroba e o quintal);
- Os submúltiplos (a onça, a oitava, o escrúpulo e o grão).

Com as Ordenações Manuelinas, em 1499, D. Manuel I introduziu uma importante reforma no domínio do peso, uma vez que os concelhos passaram a ser dotados de novos padrões, cópias dos padrões reais (Figura 2.2) [2].

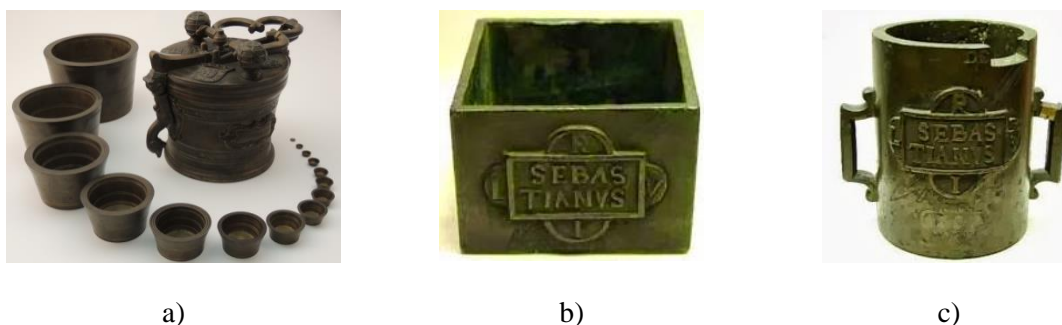


Figura 2.2 – a) Marco-padrão Manuelino; b) Medida de D. Sebastião para volumes secos; c) Padrão de volume, de líquidos, da colecção da reforma de D. Sebastião [4].

Em 1575, D. Sebastião, através da publicação da Carta de Lei de Almeirim, fixa o princípio de utilização das medidas de volume por rasoura, iguais entre si, proibindo o “cogulo”. São criadas as unidades de alqueire, utilizado para secos e líquidos (cereal e azeite), e o almude, utilizado para líquidos (vinho). Esta reforma teve de tal forma êxito, tendo sido adoptada idêntica política de distribuição de cópias dos padrões reais a todos os concelhos [2].



No século XVIII assistiu-se ao nascimento do Sistema Métrico Decimal, baseado precisamente na unidade de medida: o **metro**, utilizada na medição da grandeza de comprimento [4].

Os antigos instrumentos de medição das áreas, do volume ou capacidade (secos e líquidos), do comprimento e da massa (pesos e balanças), têm coexistido com os adoptados pela introdução do Sistema Métrico Decimal [4].

## 2.3 Metrologia

A Metrologia é a ciência da medição que compreende todos os aspectos, tanto teóricos como práticos, relacionados com a medição, qualquer que seja a sua incerteza e o domínio da ciência e da tecnologia a que se referem. A Metrologia relaciona entre si os processos, os instrumentos, o local, o metrologista, etc [5].

Pode ainda ser definida, de um modo mais simplista, como “a ciência e a arte de fazer medições” ou ainda como “o domínio do conhecimento relativo à medição”.

A metrologia está dividida em três categorias de actividade e responsabilidade (Figura 2.3).

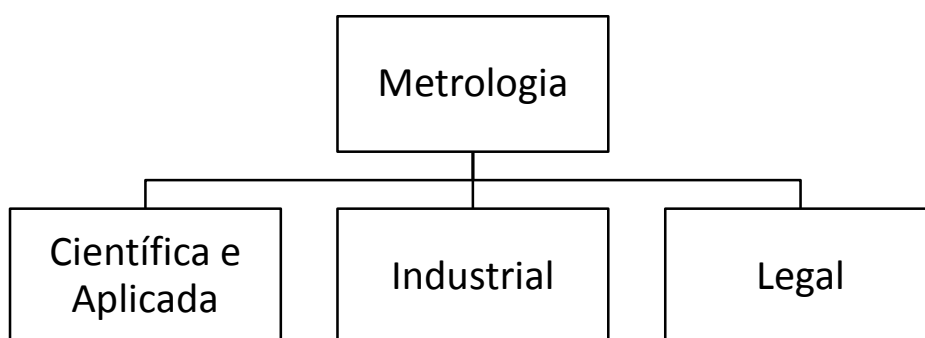


Figura 2.3 - Áreas da Metrologia.

Estas 3 categorias da Metrologia englobam ainda diferentes níveis de complexidade e de exactidão:

- A Metrologia Científica (e Aplicada) tem como objectivo a organização e o desenvolvimento de padrões de medição ou padrões primários e a sua manutenção ao mais elevado nível de qualidade, incerteza e exactidão [5].
- A Metrologia Industrial refere-se às actividades de controlo de processos e produtos, mediante a integração em cadeias de rastreabilidade (hierarquizadas) de padrões existentes nas empresas, em laboratórios de calibração e outros organismos nacionais e internacionais de metrologia [5].
- A Metrologia Legal tem como objectivo garantir que o resultado de medição está dentro de valores especificados, tendo por base uma perspectiva de mercado para protecção dos

consumidores. Está também relacionada com o controle metrológico dos instrumentos de medição usados para regulamentação, quando estes têm influência em domínios tais como a saúde, segurança, defesa do consumidor, protecção do ambiente, legislação, transacções comerciais, entre outros [5].

### 2.3.1 Rastreabilidade Metrológica

A rastreabilidade metrológica é definida como “...sendo a propriedade dum resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição.” [1]. À sequência de padrões e calibrações usada para relacionar um resultado de medição a uma referência é dado o nome de cadeia de rastreabilidade metrológica (Figura 2.4) [1].

A rastreabilidade metrológica, é a garantia, por parte da indústria, do controlo de qualidade das superfícies produzidas. É também função da rastreabilidade metrológica, a garantia da exactidão das medições de rugosidade, sendo esta última conseguida e relacionada à realização prática do metro. O processo de rastreabilidade envolve conhecimentos sobre os equipamentos de medição, sobre os padrões de rugosidade, sobre os acabamentos superficiais e sobre medição e calibração, aspectos em consideração mais adiante.



Figura 2.4 – O BIPM: definição das unidades. O IPQ: realização das unidades.

De acordo com a Figura 2.4, a rastreabilidade metrológica é assegurada através da calibração dos equipamentos (base da pirâmide), utilizando-se padrões calibrados em laboratórios acreditados (pertencentes às redes de calibração nacional ou internacional) ou em Institutos Nacionais de Metrologia (NMI) com reconhecimento mútuo internacional, sendo que estes devem participar em comparações interlaboratoriais de acordo com os requisitos do BIPM (*Bureau International des Poids et Measures*), disseminando assim as unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI).

O BIPM é uma organização intergovernamental estabelecida pela Convenção do Metro, através do qual os Estados-Membros agem em conjunto sobre assuntos relacionados à ciência e

normas de medição. A missão do BIPM é garantir e promover a comparabilidade global de medidas, incluindo a disponibilização de um sistema internacional coerente de unidades que permita a descoberta científica e inovação, a produção industrial e comércio internacional, e que permita ainda manter a qualidade de vida e o meio ambiente global [6].

O BIPM tem por incumbência de funções a unificação mundial das medidas e está também encarregue de [6]:

- Estabelecer os padrões fundamentais e as escalas das principais grandezas físicas e da conservação dos respectivos padrões internacionais;
- Efectuar comparações dos padrões nacionais e internacionais;
- Garantir a coordenação das técnicas de medidas correspondentes;
- Efectuar e coordenar as determinações relativas às constantes físicas que intervêm nessas actividades.

## **2.4 Instituto Português da Qualidade**

O Instituto português da Qualidade (IPQ) é um instituto público, integrado na administração indirecta do Estado, com autonomia administrativa e financeira e património próprio, em que prossegue atribuições do Ministério da Economia [7].

O IPQ tem por missão a coordenação do Sistema Português da Qualidade (SPQ) e de outros sistemas de qualificação regulamentar que lhe forem conferidos por lei, a promoção e coordenação de actividades que visem contribuir para demonstrar a credibilidade da acção dos agentes económicos, bem como o desenvolvimento das actividades necessárias à sua função de Laboratório Nacional de Metrologia. No âmbito do SPQ, o IPQ é a instituição responsável em Portugal por [7]:

- Gerir, coordenar e desenvolver o SPQ, numa perspectiva de integração de todas as componentes revelantes para a melhoria da qualidade de produtos, de serviços e de sistemas da qualidade e da qualificação de pessoas;
- Promover o desenvolvimento do SPQ, com vista ao incremento da qualidade, contribuindo para o aumento da produtividade, competitividade e inovação nos sectores público e privado;
- Garantir e desenvolver a qualidade através do estabelecimento de protocolos e parcerias estratégicas com entidades públicas, privadas e da economia social, bem como com infraestruturas científicas e tecnológicas que, voluntariamente ou por inerência de funções, congreguem esforços para definir princípios e meios que tenham por objectivo padrão de qualidade;

- Promover e dinamizar comissões sectoriais e outras estruturas da qualidade integradas no SPQ, preparando e gerindo o calendário das respectivas acções, encontros e reuniões;
- Instituir as marcas identificadoras do SPQ e assegurar a respectiva gestão;
- Garantir a realização e dinamização de prémios de excelência, como forma de reconhecimento e afirmação das organizações;
- Promover e desenvolver acções de formação e de apoio técnico no domínio da qualidade, designadamente no âmbito da qualificação, da normalização e da metrologia;
- Desenvolver actividades de cooperação e de prestação de serviços a entidades nacionais e estrangeiras interessadas no domínio da qualidade;
- Propor ao membro do Governo da tutela medidas conducentes à definição de políticas nacionais relativas ao SPQ no âmbito da normalização, qualificação e metrologia, nos domínios voluntário e regulamentar;
- Promover a elaboração de normas portuguesas e de documentos normativos, garantindo a coerência e actualidade do acervo normativo nacional;
- Qualificar e reconhecer como Organismos de Normalização Sectorial (ONS) as entidades públicas ou privadas nas quais o IPQ, I. P., delegue funções de normalização técnica em sectores de actividade específicos;
- Coordenar e acompanhar os trabalhos de normalização nacional desenvolvidos no âmbito da rede de ONS, comissões técnicas de normalização e outras entidades qualificadas no âmbito do SPQ;
- Assegurar e promover a representação e a participação de Portugal como membro das organizações, comités, grupos de trabalho e outras instâncias de âmbito europeu e internacional, no âmbito das suas atribuições e competências e as obrigações daí decorrentes;
- Gerir o sistema de notificação prévia de regulamentos técnicos e de normas, no âmbito da União Europeia e da Organização Mundial de Comércio, de acordo com a legislação aplicável;
- Promover o ajustamento da legislação nacional às normas nacionais, europeias e internacionais, nomeadamente assegurando a transposição de directivas comunitárias na sua área de competências;
- Assegurar o cumprimento dos procedimentos das directivas comunitárias no que diz respeito à qualificação, notificação à Comissão Europeia e manutenção actualizada da base de dados europeia dos organismos notificados no âmbito de cada directiva;
- Acompanhar iniciativas e programas comunitários que tenham implicações no seu âmbito de actividade;
- Gerir o Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), nas suas componentes científica e aplicada, assegurando a realização, manutenção e desenvolvimento dos padrões nacionais

das unidades de medida e a sua rastreabilidade ao Sistema Internacional (SI), promovendo a disseminação dos valores das unidades SI no território nacional;

- Assegurar e gerir o sistema de controlo metrológico legal dos instrumentos de medição, reconhecer entidades competentes para o exercício delegado desse controlo, sempre que tal se revele necessário para garantir a efectiva cobertura a nível nacional, e coordenar a rede constituída por aquelas entidades;
- Assegurar a implementação, articulação e inventariação de cadeias hierarquizadas de padrões de medida, promover o estabelecimento de redes de laboratórios metrológicos acreditados e a realização de comparações interlaboratoriais nacionais;
- Assegurar a representação de Portugal como membro das organizações de metrologia europeias e internacionais e as obrigações daí decorrentes, nomeadamente a participação nos respectivos trabalhos, a comparação de padrões, a rastreabilidade ao SI e em projectos de investigação e desenvolvimento;
- Gerir o Museu de Metrologia e promover a recolha, preservação, estudo e divulgação do espólio metrológico com interesse histórico.

## **2.5 Departamento de Metrologia**

A missão do Departamento de Metrologia (DMET) é a de certificar o rigor e a rastreabilidade das medições no território nacional, através dos padrões de medida necessários à indústria e à sociedade portuguesa em geral e contribuir para a construção de uma liderança metrológica europeia no quadro da economia mundial [8].

O Departamento de Metrologia do IPQ é constituído pela Unidade Laboratório Nacional de Metrologia (LNM), pela Metrologia Legal e pelo Museu.

O LNM possui os padrões nacionais das unidades de base das grandezas de base do Sistema Internacional (SI): comprimento (metro), massa (quilograma), tempo (segundo), temperatura termodinâmica (kelvin), corrente eléctrica (ampere), intensidade luminosa (candela) e quantidade de matéria (mole) e de inúmeras grandezas derivadas do SI.

O LNM assegura a realização dos padrões nacionais das unidades de medida, assegurando e garantindo a cadeia nacional de rastreabilidade.

No domínio da Metrologia Aplicada realiza a calibração de padrões dos laboratórios nacionais acreditados e da indústria em geral, participa e coordena diversas comparações interlaboratoriais, nacionais e internacionais.

O LNM engloba os seguintes domínios metrológicos:

- Comprimento, Ângulo e Metrologia Dimensional;
- Tempo e Frequência;
- Fotometria, Radiometria e Radiofrequências;
- Electricidade e Acústica;
- Temperatura e Humidade;
- Massa, Força e Pressão;
- Propriedades de Líquidos;
- Volume;
- Quantidade de Matéria, Electroquímica e Gases de Referência.

## 2.6 Laboratório de Comprimento

O Laboratório de Comprimento (LCO) é responsável pelo desenvolvimento dos padrões metrológicos nacionais de Comprimento e Ângulo Plano, incumbindo-lhe designadamente:

- A realização prática da definição de metro e radiano;
- A realização de calibrações;
- A participação e coordenação de comparações interlaboratoriais;
- Apoiar a metrologia legal.

O trabalho desenvolvido no decurso da elaboração da Dissertação decorreu no Laboratório de Comprimento (Figura 2.5) do Departamento de Metrologia do Instituto Português da Qualidade (LCO), em particular na área de trabalho do Laboratório correspondente à “Forma e Rugosidade”, em colaboração com o Departamento de Engenharia Mecânica e Industrial da FCT/UNL.



Figura 2.5 - Foto do Laboratório de Comprimento – Forma e Rugosidade.

## 2.7 Sistema Internacional de Unidades

O Sistema Métrico Decimal criado em 1789 adoptou, inicialmente, três unidades básicas de medida: o metro, o litro e o quilograma. Posteriormente, este sistema foi consagrado internacionalmente através da Convenção do Metro. Entretanto, o desenvolvimento científico e tecnológico passou a exigir medições cada vez mais exactas e em muitos outros domínios, tendo sido sucessivamente aprovadas novas unidades e outras regras pela Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM). Em 1960, o sistema métrico decimal foi designado de Sistema Internacional de Unidades (SI). O SI define os nomes, símbolos e definições das unidades, bem como os prefixos e símbolos dos múltiplos e submúltiplos das mesmas unidades e contempla ainda recomendações para a escrita e para a utilização dos símbolos aprovados pela CGPM [9].

O SI<sup>1</sup> foi adoptado em Portugal pelo Decreto-Lei nº 128/2010, de 3 de Dezembro [9], sendo constituído por:

- Unidades de base;
- Unidades derivadas.

As unidades de base são sete unidades bem definidas que, por convenção são consideradas como dimensionalmente independentes: o metro, o quilograma, o segundo, o ampere, o kelvin, o mole e a candela [10].

Unidades derivadas são aquelas que são formadas por combinação das unidades de base de acordo com as relações algébricas que podem ser expressas a partir das unidades de base dadas por expressões algébricas sob a forma de produtos de potência das unidades SI de base com um factor numérico igual a 1. Os nomes e símbolos de algumas das unidades assim formados podem ser substituídos por nomes e símbolos especiais, podendo estes últimos, ser utilizados para formar as expressões e símbolos de outras unidades derivadas.

As unidades de base do SI são apresentadas na Tabela 2.1.

---

<sup>1</sup> 20ª CGPM de 1995, Resolução nº8, BIPM

Tabela 2.1 - Unidades de base do SI [9].

Grandeza	Unidade	
	Nome	Símbolo
<b>Comprimento</b>	<b>Metro</b>	<b>m</b>
Massa	Quilograma	kg
Tempo	Segundo	s
Corrente eléctrica	Ampere	A
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K
Quantidade de matéria	Mole	mol
Intensidade luminosa	Candela	cd

### 2.7.1 Metro

A 7 de Abril de 1795 foi definida a unidade de medida “metro” como sendo “igual à décima milionésima parte de um arco dum meridiano terrestre”, mas especificado através de medições do meridiano terrestre entre Dunquerque e Barcelona [10]. Em 1927 alterou-se o processo de medição a efectuar no mesmo padrão materializado do metro, com o seguinte procedimento de medição: “A unidade de comprimento é o metro, definido pela distância, a 0°, dos eixos de dois traços médios marcados na barra de platina irradiada depositada no *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM), e declarada Protótipo do metro pela *1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas* (CGPM), estando esta régua submetida à pressão atmosférica normal e suportada por dois roletes de pelo menos um centímetro de diâmetro, situados geometricamente num mesmo plano horizontal e à distância de 571 mm entre si” (Figura 2.6) [10]. Em 1983 surge a definição actual do metro, como sendo “o comprimento do trajecto percorrido pela luz, no vazio durante um intervalo de tempo de  $1/299\,792\,458$  do segundo”, que é a unidade da grandeza de base comprimento, pelo que é uma unidade de base do SI [10].



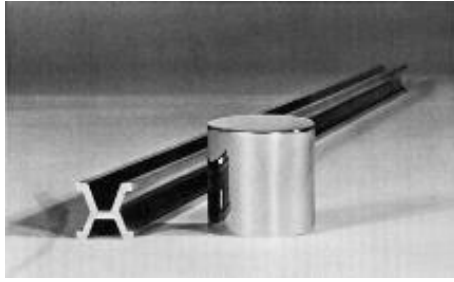


Figura 2.6 – Barra de platina-irídio utilizada como protótipo do metro [4].

O *Comité International des Poids et Mesures* (CIPM) através da sua Recomendação nº 1 de 1983, adoptou que o metro deve ser realizado em concordância com um dos seguintes métodos [10]:

- 1) Através do comprimento,  $l$ , do trajecto percorrido, no vazio, por uma onda plana electromagnética durante um intervalo de tempo  $t$ ; o comprimento é obtido medindo-se um intervalo de tempo,  $t$ , utilizando a relação  $l = c_0 \times t$ , onde  $c_0 = 299\,792\,458$  m/s é a velocidade da luz no vazio.
- 2) Através do comprimento de onda no vazio,  $\lambda_1$ , de uma onda plana electromagnética de frequência  $f_1$ ; este comprimento de onda é obtido a partir da medição de  $f_1$ , utilizando a relação  $\lambda_1 = \frac{c_0}{f_1}$ .
- 3) Através de uma das radiações da lista publicada pelo BIPM, cujo valor do comprimento de onda ou da frequência pode ser utilizado com a incerteza explicitada e com as especificações e as boas práticas de laboratório a ser seguidas.



### 3 Princípios da Avaliação da Incerteza de Medição

O documento que estabelece regras gerais para a avaliação e expressão da incerteza na medição que podem ser seguidas na maior parte dos domínios das medições físicas é denominado de “*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*” – GUM. A medição é o processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente atribuídos a uma grandeza [1]. Sempre que se realizam medições laboratoriais, existe uma incerteza associada ao valor medido. O valor correspondente a essa medição é uma aproximação ao valor real. Em trabalhos experimentais, tais como trabalhos laboratoriais, é praticamente inevitável a ocorrência de erros. Daqui resulta que os valores das medições não sejam iguais aos “valores reais”. O valor medido deve então incluir a sua incerteza associada bem como as suas unidades SI correspondentes [11].

O resultado de medição é apenas uma aproximação ou uma estimativa do valor da mensuranda, porque sempre que se efectua uma medição, existe um erro associado ao valor medido. Esse erro de medição é a diferença entre o valor medido (VM), e um valor de referência (VR) de uma grandeza dado pela Equação 3.1 [1]:

$$\varepsilon = VM - VR \quad \text{Equação 3.1}$$

O conceito de “erro de medição” pode ser utilizado quando existe um único valor de referência, o que ocorre se uma calibração é efectuada por meio de um padrão de medição cuja incerteza de medição é desprezável, ou se é dado um valor convencional, neste caso o erro é conhecido. Este conceito também pode ser utilizado se se supuser que a mensuranda é representada por um único valor verdadeiro ou um conjunto de valores verdadeiros de amplitude desprezável, neste caso o erro de medição é desconhecido [1].

Para o erro de medição contribuem dois tipos de erros: o erro aleatório e o erro sistemático.

O erro sistemático é a componente do erro de medição que, em medições repetidas, permanece constante ou varia de maneira previsível. Um valor de referência para um erro sistemático é um valor verdadeiro, ou um valor medido de um padrão com incerteza de medição desprezável, ou um valor convencional. O erro sistemático e as suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos. Pode-se aplicar uma correcção para compensar um erro sistemático conhecido [1].

O erro aleatório é a componente do erro de medição que, em medições repetidas, varia de maneira imprevisível. O valor de referência para um erro aleatório é a média que resultaria de um número infinito de medições repetidas da mesma mensuranda. Os erros aleatórios de um conjunto de

medições repetidas formam uma distribuição que pode ser resumida pela sua esperança matemática, a qual é geralmente assumida como sendo nula, e pela sua variância [1].

### 3.1 Incerteza de Medição

Para se calcular a estimativa de incerteza, geralmente usa-se o procedimento descrito pelo *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (GUM) de acordo com os passos seguintes:

- Exprimir em termos matemáticos a dependência da mensuranda  $Y$  em relação às grandezas de entrada  $X_i$ ;
- Listar todas os componentes de incerteza;
- Avaliar o tipo de incerteza (A ou B);
- Calcular a incerteza-padrão para cada componente da incerteza;
- Calcular os respectivos coeficientes de sensibilidade;
- Avaliar a necessidade de cálculo de covariâncias;
- Calcular a incerteza combinada;
- Calcular o factor de expansão,  $k$ ;
- Determinar a incerteza expandida.

A mensuranda é a grandeza que se pretende medir [1]. Em regra, na calibração de equipamentos, lida-se apenas com uma única mensuranda ou grandeza de saída,  $Y$ , que depende de um certo número de grandezas de entrada,  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), de acordo com a seguinte relação funcional (Equação 3.2):

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Equação 3.2}$$

O conjunto das grandezas de entrada,  $X_i$ , podem ser agrupadas em categorias, de acordo com o modo como foram determinados o valor da grandeza e da incerteza associada:

- As grandezas cuja estimativa e incerteza associadas são determinadas directamente na medição. Estes valores podem ser obtidos, por exemplo, de uma simples observação, de observações repetidas, ou de avaliação baseada na experiência. Podem envolver a determinação de correcções às indicações de instrumentos, bem como as correcções das grandezas de influência, como sejam a temperatura ambiente, a pressão atmosférica ou a humidade relativa;
- As grandezas cuja estimativa e incertezas associadas são provenientes de origens externas à medição, tais como as grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, aos materiais de referência certificados ou aos dados de referência obtidos de manuais.

## 3.2 Avaliação da Incerteza de Medição de Estimativas das Grandezas de Entrada

A avaliação da incerteza de medição é feita com base numa estimativa das grandezas de entrada que se dividem em duas categorias de avaliação, “Tipo A” e “Tipo B”, que se baseiam em distribuições de probabilidades.

A incerteza de medição é composta, em geral, por muitas componentes. Algumas destas podem ser estimadas por uma avaliação de Tipo A da incerteza de medição, a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de séries de medições e podem ser caracterizadas por desvios-padrão. Outras, podem ser estimadas por uma avaliação de Tipo B da incerteza de medição, podem também ser caracterizadas por desvios-padrão avaliados através de funções de densidade de probabilidade baseadas na experiência ou em outras informações [1].

### 3.2.1 Avaliação de Tipo A da Incerteza-Padrão

A avaliação Tipo A corresponde a uma componente da incerteza de medição por meio de análise estatística dos valores medidos alcançados em condições de medição especificadas. A análise estatística é efectuada através do desvio-padrão experimental da média ou da análise de uma regressão matemática [1].

A avaliação do tipo A da incerteza-padrão pode ser aplicada nas condições de repetibilidade de uma das grandezas de entrada,  $X_i$ , com o número de observações,  $n$ , ( $n > 1$ ) independentes, adquiridas sob as mesmas condições de medição, com a obtenção da estimativa da grandeza, utilizando a média aritmética dos valores individualmente observados,  $q_j$  ( $j=1, 2, \dots, n$ ):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Equação 3.3}$$

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad \text{Equação 3.4}$$

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad \text{Equação 3.5}$$

$$u(x_i) = s(\bar{q}) \quad \text{Equação 3.6}$$

Com:

- $s^2(q)$  – Variância Experimental da Média;
- $s(q)$  – Desvio Padrão;
- $n$  – Número de Observações;
- $\bar{q}$  – Média Aritmética dos Valores Individualmente Observados,  $q_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ).

Nota: Considerou-se que apenas com uma dimensão de amostra maior ou igual a 12 medições, é que se divide pela dimensão da amostra,  $n$ .

A incerteza-padrão,  $u(x_i)$ , da estimativa da grandeza,  $\bar{q}$ , de entrada é o desvio-padrão experimental da média (Equação 3.6).

### 3.2.2 Avaliação de Tipo B da Incerteza-Padrão

A avaliação de Tipo B da incerteza-padrão é a avaliação da incerteza associada a uma estimativa,  $x_i$ , de uma grandeza de entrada,  $X_i$ , por outros meios além dos da análise estatística de séries de observações. A incerteza-padrão associada,  $u(x_i)$ , é avaliada por análise científica com base em toda a informação disponível sobre a variabilidade possível de  $X_i$ . A esta categoria pertencem valores provenientes de:

- Dados de medições prévias;
- Experiência de/ou conhecimento geral do comportamento da mensuranda da instrumentação, das propriedades de materiais e das técnicas de medição;
- Dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- Especificações de fabricantes;
- Incertezas atribuídas a dados de referência obtidas em manuais ou outras publicações.

Uma avaliação de Tipo B pode ser tão fiável como uma avaliação de Tipo A da incerteza-padrão, sobretudo em situações de medições em que a avaliação Tipo A se baseia apenas num número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes.

Para o cálculo de incertezas do Tipo B o GUM indica um procedimento que consiste em admitir uma distribuição de probabilidade para a grandeza,  $X_i$ , tais como: Distribuição Normal, Distribuição Rectangular ou Distribuição Triangular.

#### 3.2.2.1 Distribuição Normal

A distribuição normal (Figura 3.1) é uma distribuição de probabilidade contínua, que descreve as variáveis aleatórias independentes e frequência relativamente à magnitude dos valores de medição. Este tipo de distribuição é normalmente utilizada na avaliação da incerteza de medição de Tipo A, embora exista casos de utilização na avaliação de Tipo B quando existe informação de que os valores

da grandeza de entrada,  $X_i$ , se encontram mais centrais em relação aos valores limite. Quando a estimativa,  $x_i$ , é retirada de certificados de calibração, especificações de fabricantes ou de outras incertezas padrão, a incerteza é obtida através da divisão desse valor de incerteza pelo factor de expansão,  $k$ , (Equação 3.7) [11]:

$$u(x_i) = \frac{a}{k} \quad \text{Equação 3.7}$$

Com:

- $a$  – Valor da incerteza expandida apresentada no Certificado ( $U_n$ )
- $k$  – Factor de expansão (=2)

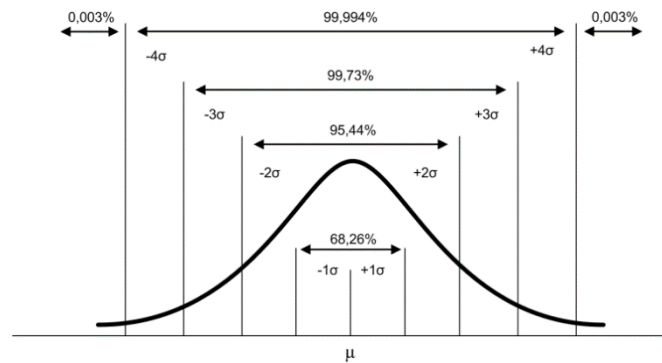


Figura 3.1 - Distribuição Normal [11].

### 3.2.2.2 Distribuição Rectangular

A distribuição rectangular ou uniforme (Figura 3.2) é uma distribuição cuja probabilidade é constante em intervalos da mesma dimensão. Esta distribuição é utilizada na situação de conhecimento insuficiente da grandeza de entrada,  $X_i$ , na ausência de qualquer outra informação que não seja a dos seus limites de variabilidade,  $a_+$  e  $a_-$ . A incerteza-padrão é expressa pela Equação 3.8 [11]:

$$u(x_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{\sqrt{12}} \quad \text{Equação 3.8}$$

No caso de a diferença entre os valores limite for,  $2a$ , a equação da incerteza-padrão será (Equação 3.9):

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad \text{Equação 3.9}$$

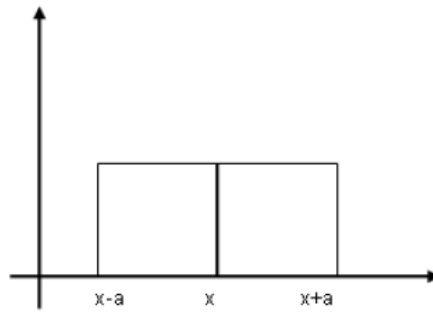


Figura 3.2 - Distribuição Rectangular [11].

### 3.2.2.3 Distribuição Triangular

Se for conhecido *a priori* que os valores centrais da grandeza são mais prováveis que os valores limite, deverá ser utilizada uma distribuição triangular. De outro modo, se os valores perto dos valores limite são os mais prováveis, então será mais apropriado utilizar uma distribuição em “forma-de-U”. A incerteza-padrão será então definida pela Equação 3.10 [11]:

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad \text{Equação 3.10}$$

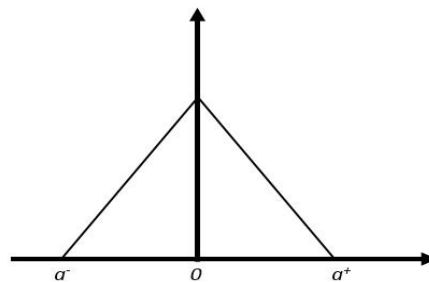


Figura 3.3 - Distribuição Triangular [11].

### 3.2.3 Cálculo da Incerteza-Padrão da Estimativa da Grandeza de Saída

No caso de grandezas de entrada não estarem correlacionadas entre si, o quadrado da incerteza-padrão da estimativa da grandeza de saída,  $y$ , é dado por (Equação 3.11) [11]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{Equação 3.11}$$

A grandeza,  $u_i(y)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), é a contribuição para a incerteza-padrão associada à estimativa de grandeza de saída,  $y$ , resultando da incerteza-padrão associada à estimativa da grandeza de entrada,  $x_i$ , (Equação 3.12):



$$u_i(y) = c_i \times u(x_i) \quad \text{Equação 3.12}$$

Onde,  $c_i$ , é o coeficiente de sensibilidade associado à estimativa da grandeza de entrada,  $x_i$ , i.e., a derivada parcial da função modelo,  $f$ , em relação a,  $X_i$ , avaliada nas estimativas  $x_i$  da grandeza de entrada (Equação 3.13):

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad \text{Equação 3.13}$$

O coeficiente de sensibilidade,  $c_i$ , descreve como a estimativa da grandeza de saída,  $y$ , é influenciada pelas variações de cada uma das estimativas das grandezas de entrada,  $x_i$ .

Quando as grandezas de entrada,  $x_i$  e  $x_j$ , estão correlacionadas, deve-se ter em conta as covariâncias associadas, considerando-as como uma contribuição adicional para a incerteza. A lei de propagação de incerteza para estes casos é dada por (Equação 3.14) [11]:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(x_i, x_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left( \frac{1}{2} c_{ij}^2 + c_{ij} \right) u^2(x_i) u^2(x_j)$$

$$\text{Equação 3.14}$$

### 3.2.4 Incerteza de Medição Expandida

A incerteza de medição expandida,  $U$ , obtém-se mediante a multiplicação da incerteza-padrão combinada,  $u_c(y)$ , da estimativa da grandeza de saída por um factor de expansão,  $k$ , (Equação 3.15) [11]:

$$U = k \times u_c(y) \quad \text{Equação 3.15}$$

O factor de expansão,  $k$ , corresponde a uma determinada probabilidade expandida tendo em conta a fiabilidade da incerteza-padrão,  $u(y)$ , da estimativa da grandeza de saída,  $y$ . O procedimento utilizado para o cálculo do factor de expansão,  $k$ , é efectuado através da determinação do número de graus de liberdade efectivos,  $\nu_{ef}$ , da estimativa da grandeza de saída,  $y$ , dependente da amostra utilizada na Tabela 3.1.

De acordo com o GUM, o número de graus de liberdade efectivos da incerteza padrão,  $u(y)$ , da estimativa da grandeza de saída,  $y$ , é calculado pela fórmula de *Welch-Satterthwaite* (Equação 3.16):

$$v_{ef} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad \text{Equação 3.16}$$

Em que,  $u_i(y)$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ), definidos pela equação anterior são as contribuições para a incerteza padrão da estimativa de saída,  $y$ , resultantes das incertezas padrão das estimativas de entrada,  $x_i$ , assumidas serem estatística e mutuamente independentes, e,  $v_i$  o, número de graus de liberdade efectivos da componente de incerteza-padrão,  $u_i(y)$  [11].

Para uma dada incerteza padrão,  $u(\bar{q})$ , obtida por uma avaliação do Tipo A, o número de graus de liberdade efectivos é dado por  $v_i = n - 1$ . É mais problemático associar graus de liberdade com uma incerteza-padrão,  $u(x_i)$ , obtida por uma avaliação de Tipo B. No entanto, se por exemplo são definidos limites  $a_-$  e  $a_+$ , que são habitualmente escolhidos por forma a que a probabilidade da grandeza em questão estar fora dos limites seja extremamente pequena, então os graus de liberdade são assumidos como sendo,  $v_i \rightarrow \infty$ , tomando portanto o factor de expansão  $k$  o valor de 2 [11].

Através da Tabela 3.1, que se baseia numa distribuição *t-student* é possível obter-se a relação do factor de expansão  $k$ , com o número de graus de liberdade efectivos,  $v_{ef}$ . Caso  $v_{ef}$  calculado não seja inteiro, o que sucede normalmente, deve-se truncar  $v_{ef}$  para o inteiro imediatamente inferior [11].

Tabela 3.1 - Factores de Expansão,  $k$ , para diferentes números de graus de liberdade efectivos  $v_{ef}$  [11].

$v_{ef}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	20	50	$\infty$
$k$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,13	2,05	2,00

Ao se considerar o componente da incerteza associado à utilização de padrões ou de instrumentos de medição calibrados por uma entidade externa ao laboratório, e sempre que o respectivo certificado de calibração não indique o número de graus de liberdade efectivos da calibração, mas somente o factor de expansão,  $k = 2$ , deverá assumir-se um número de graus de liberdade efectivos, igual a 50 [11].

### 3.2.5 Expressão da Incerteza de Medição em Certificados de Calibração

Na realização da calibração de equipamentos de medição, o resultado completo da medição a ser apresentado no certificado de calibração, consiste na estimativa,  $y$ , da mensuranda e na incerteza expandida associada,  $U$ , expresso na forma (Equação 3.17):

$$Y = y \pm U \quad \text{Equação 3.17}$$

Por norma, deverá apresentar-se uma nota adicional com o seguinte conteúdo:

*“A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo factor de expansão  $k = XX$ , o qual para uma distribuição- $t$  com  $v_{ef} = YY$  graus de liberdade efectivos corresponde a uma probabilidade de 95%, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento *Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)*”).*



## 4 Acabamentos de Superfícies

O termo “acabamento de superfície” refere-se comumente às irregularidades (picos e vales) produzidas numa superfície pelo processo de fabrico. Por convenção, a topografia de uma superfície de uma peça é composta por dois componentes: rugosidade e ondulação. A rugosidade consiste nas irregularidades finas características do próprio processo de fabrico em si mesmo, que o trabalho mecânico da superfície pode induzir, enquanto que a ondulação consiste em irregularidades de forma mais espaçadas, que são frequentemente produzidas por vibração decorrente no processo de maquinagem. A topografia de uma superfície inclui, pois, a componente de acabamento de superfície, bem como quaisquer outras irregularidades, tais como o erro de forma [12]. Nas figuras 4.1 e 4.2, é exemplificada a distinção entre rugosidade e ondulação.

Normalmente, os termos “acabamento de superfície” e “rugosidade” são associados e utilizados indiferenciadamente, devido ao facto da rugosidade ser especificada e medida muito mais frequentemente que a ondulação. O acabamento de superfície de qualquer peça deve ser adequado ao tipo de função que exerce – decorre deste facto a importância do estudo do acabamento de superfície -, o qual deve ser tanto melhor quanto maiores forem as exigências na qualidade superficial da peça final.

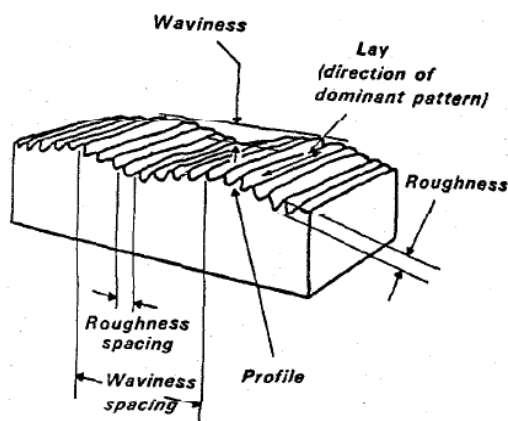


Figura 4.1 - Rugosidade e ondulação numa superfície [32].

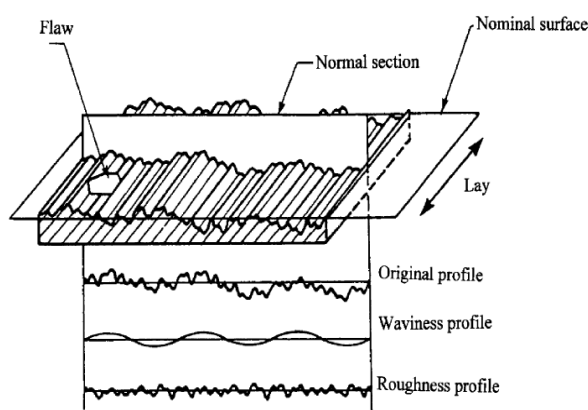


Figura 4.2 - Características de Superfície e terminologia [31].

Quanto à qualidade superficial há que distinguir o grau de uniformidade e o grau de acabamento [13]. O grau de uniformidade refere-se aos maiores ou menores desvios que a forma da superfície pode apresentar em relação ao que deveria ser a sua geometria perfeita [13]. Estes desvios traduzem-se pelos chamados erros de forma ou ondulações [13].

Dependendo do tipo de processo de fabrico utilizado, obtêm-se os mais variados acabamentos de superfície. O grau de acabamento está relacionado com as irregularidades mais ou menos pronunciadas que o trabalho mecânico da superfície pode provocar [13], sendo que a medida do grau de acabamento é a rugosidade da superfície, a qual é definida como o conjunto de irregularidades da superfície, convencionalmente definidas numa região da superfície em que não existam erros de forma ou ondulações [13]. Os acabamentos superficiais estão directamente relacionados com o grau de qualidade do acabamento exigido para as superfícies e, do mesmo modo que ocorre para as tolerâncias, a produção de superfícies com elevado grau de acabamento de superfície implica, no geral, custos de fabrico mais elevados [14]. Do ponto de vista de fabrico e funcionamento, pode afirmar-se que a superfície ideal é aquela que satisfaz os requisitos funcionais exigidos [14].

Os acabamentos superficiais são importantes, tendo em conta que estes influenciam factores, tais como a exactidão, a tolerância dimensional, a resistência à corrosão e à fadiga, o escoamento de fluidos, a lubrificação e a transmissão de calor verificada nas peças [14]. A exactidão e a tolerância dimensional são muito importantes em peças com ajustamento entre furo e veio e que tenham movimento relativo [15]. Neste caso, superfícies com maior rugosidade estarão expostas a um desgaste mais intenso do que o que sofreriam caso tivessem um melhor acabamento (menor rugosidade). Simultaneamente, a resistência à corrosão de superfícies com pior acabamento superficial é menor pois pode reter maior quantidade de líquidos e vapores do que superfícies com melhores acabamentos [15]. Desse modo, tornam-se mais vulneráveis à corrosão. No que diz respeito ao escoamento de fluidos, um melhor acabamento superficial influencia o regime de escoamento, permitindo escoamentos em regime laminar para uma maior gama de velocidades, reduzindo a turbulência, a formação de vórtices e de recirculação de caudal. No caso de pistões ou de elementos que actuem como retentores, as superfícies com melhor acabamento superficial também garantem uma vedação mais eficiente [15].

Para além do referido, a ocorrência de fractura por fadiga está também directamente relacionada com o grau de acabamento de superfície. A fadiga é a causa principal da ruína de equipamentos mecânicos e pode-se definir como sendo o fenómeno de enfraquecimento progressivo e localizado de um material quando este está submetido a cargas dinâmicas ou repetidas [16]. São vários os factores que influem na duração da vida à fadiga, tais como a geometria e a dimensão das peças, as tensões residuais, tratamento térmico, meio ambiente, temperatura, revestimentos e claro está, o acabamento de superfície [16]. A resistência à fadiga é melhorada quando os acabamentos superficiais são também melhores, pois superfícies com elevada rugosidade apresentam micro-entanches mais propensos à concentração de tensões, contribuindo deste modo para a plastificação localizada do material e à propagação de fendas por fadiga [16]. Este é um dos motivos para que uma superfície de uma peça sujeita a cargas cíclicas deva ser preferencialmente polida, de modo a aumentar o valor da

vida à fadiga do componente, decorrente do aumento significativo da fase de iniciação de fendas, (Figura 4.3):

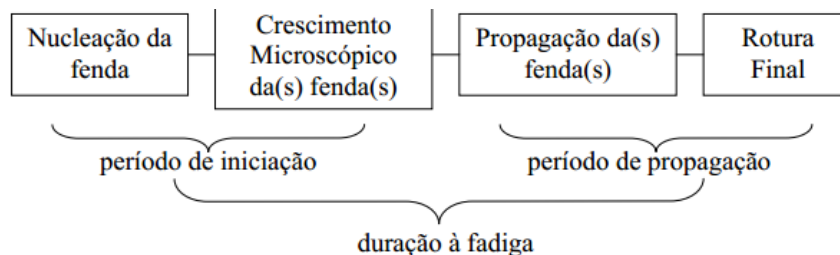


Figura 4.3 - Fases da fadiga [16].

O efeito do acabamento superficial na tensão limite de fadiga é introduzido pelo factor de acabamento (Figura 4.4), o qual tem em consideração a dureza (ou a tensão de rotura do material). Verifica-se que, para idêntico valor de tensão de rotura, um melhor acabamento superficial conduz a factores de acabamento de maior valor, o que se traduz em valores de tensão limite de fadiga mais elevados (Figura 4.4).

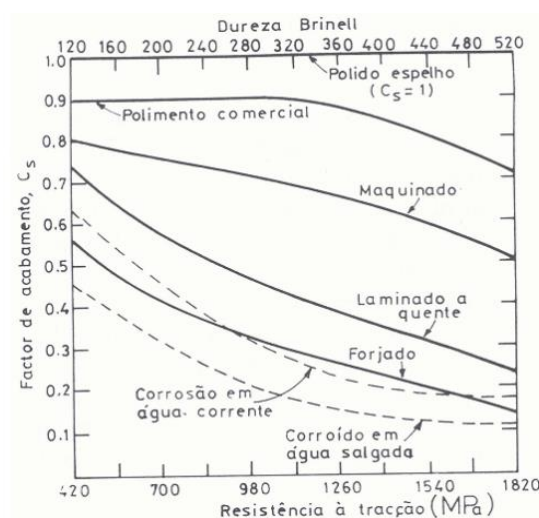


Figura 4.4 - Efeito do Estado Superficial [16].

A relação das tolerâncias dimensionais com o estado de acabamento de uma superfície é também bastante importante, uma vez que quando são especificados valores baixos para as tolerâncias, tal implica ter bons acabamentos superficiais (Rugosidade média,  $Ra \approx IT/30$ ). No entanto, o seu inverso não é verdade [14].

Nota: IT designa Classes de Rugosidade.

A natureza de uma superfície fica definida pelo seu tipo de qualidade. No que diz respeito às superfícies ditas em estado bruto, estas correspondem a superfícies que permanecem tal como as

deixaram os processos de fabrico que lhes deram origem, como são exemplo as superfícies obtidas através de processos de fundição, forjagem, etc, em que não se verificou remoção de material. Os acabamentos de superfícies trabalhadas com remoção de material (Figura 4.5 b) e c)) correspondem a superfícies obtidas em geral por processos de corte com arranque de apra e resultam da utilização de processos de fabrico tais como o torneamento, fresagem, aplainamento, ou a rectificação, por exemplo. Para além do referido, as superfícies, em estado bruto ou trabalhadas, podem ainda ser submetidas a tratamento especial, que lhes confere uma determinada aparência ou certas propriedades, estando a têmpera, niquelagem ou a pintura, por exemplo, entre estes [17] [18].



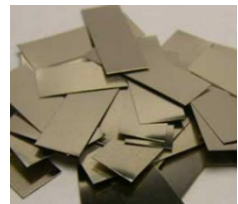
a) Peça obtida por fundição (sem tratamento/em bruto)



b) Peça obtida por torneamento



c) Peça obtida por torneamento e fresagem



d) Niquelagem

Figura 4.5 – Exemplos de acabamentos superficiais [18].

Os processos de maquinação devem ser estabelecidos de modo a que possam reproduzir a superfície especificada, a qual deverá apresentar os parâmetros nominais que a caracterizam numa dada gama de valores, de modo a que possa ser produzida em diferentes máquinas-ferramenta, independentemente do local e da ocasião em que ocorre. As superfícies maquinadas apresentam sempre desvios relativamente à superfície ideal ou teórica, nunca se podendo portanto considerar como uma superfície perfeita em termos absolutos. A textura de uma superfície é composta por desvios aleatórios e desvios repetitivos de um perfil (P), relativamente a um perfil nominal (N) (Figura 4.6) [19].

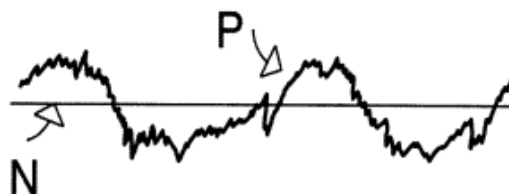


Figura 4.6 – Perfil real (P) e perfil nominal (N) de uma superfície [19].

As diferentes ordens de grandeza apresentadas pelos desvios são classificadas por desvios geométricos, ondulação e rugosidade (Tabela 4.1 e Figura 4.7), podendo contudo ocorrer falhas pontuais na superfície, as quais podem ser devidas a: heterogeneidade e plasticidade do material da



peça maquinada, ocorrências imprevistas durante a maquinação (por exemplo, a inclusão de pedaços de aparas entre a ferramenta e a superfície maquinada) [19].

Tabela 4.1 – Ordens de grandeza dos desvios geométricos [19].

Tipo de desvio	Possíveis origens do desvio
<p>a) Desvios geométricos (Figura 4.7-a)</p> <p>De planicidade</p> <p>De linearidade</p> <p>De circularidade</p> <p>De cilindricidade</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Imperfeição na fixação da peça, da ferramenta, ou de ambas.</li> <li>• Qualidade da máquina-ferramenta.</li> <li>• Deformação durante a operação da peça, ferramenta, ou de ambas.</li> </ul>
<p>b) Ondulação (Figura 4.7-b)</p> <p>Irregularidades geométricas tais que a distância entre dois dos seus pontos esteja compreendida entre dois limites (ex.: 500 <math>\mu\text{m}</math> e 2500 <math>\mu\text{m}</math>)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excentricidades no movimento da ferramenta.</li> <li>• Vibrações no sistema peça-ferramenta (na peça, ferramenta ou em ambas).</li> </ul>
<p>c) Rugosidade (Figura 4.7-c)</p> <p>Irregularidades geométricas tais que a distância entre dois dos seus picos esteja compreendida entre 0 e 500 <math>\mu\text{m}</math>, por exemplo</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excentricidades no movimento da ferramenta.</li> <li>• Deformação da ferramenta durante a operação.</li> </ul>
d) Composição dos desvios (Figura 4.7-d)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combinação de diferentes origens.</li> </ul>

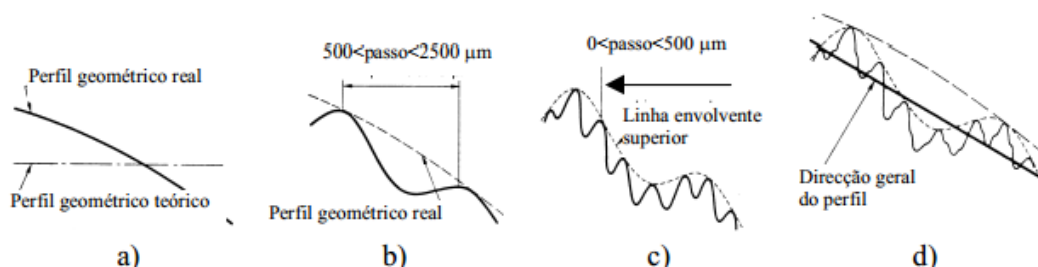


Figura 4.7 – Tipos de desvios: a) desvio geométrico, b) ondulação, c) rugosidade, d) composição dos desvios (perfil real) [19].

## 4.1 Simbologia gráfica para indicação do acabamento de superfícies

A norma para indicação da rugosidade superficial em desenho técnico é a ISO 1302 [20]. Esta norma define como apresentar a indicação dos estados de superfície nos desenhos técnicos, apresentando os símbolos gráficos necessários para a indicação do acabamento de superfície. Informa também acerca de como se deve realizar a indicação, nos desenhos técnicos, do método de fabrico ou informação relacionada, interpretação e orientação das estrias presentes na superfície, tolerâncias dimensionais e geométricas.

### 4.1.1 Símbolo gráfico básico

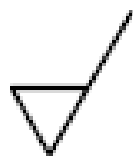
O símbolo gráfico básico é composto por duas linhas rectas de diferente comprimento, desenhadas com linha contínua fina, inclinadas a cerca de  $60^\circ$  relativamente à linha que representa a superfície considerada, como evidenciado na Figura 4.8. O símbolo gráfico básico (Figura 4.8) não deve ser utilizado sem informação complementar [20].



Figura 4.8 - Símbolo gráfico básico para acabamento superficial [20].

### 4.1.2 Símbolos gráficos expandidos

Sempre que seja necessária a remoção de material (por maquinaria, por exemplo), ou caso a mesma não seja permitida, de modo a obter uma determinada superfície, os símbolos a apresentar são os seguintes (Figura 4.9):



a) Requerida a remoção de material



b) Proibida a remoção de material

Figura 4.9 – Símbolos gráficos expandidos: a) Requerida a remoção de material, b) Proibida a remoção de material [20].

### 4.1.3 Símbolo gráfico completo

Sempre que for necessário indicar os requisitos complementares para características de acabamentos de superfície, deve ser adicionada uma linha ao longo do braço de qualquer um dos símbolos gráficos ilustrados nas Figura 4.8 e Figura 4.9, tal como se mostra na Figura 4.10:

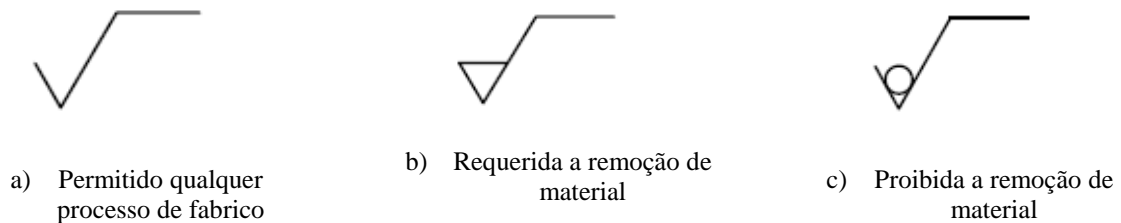


Figura 4.10 – Símbolo gráfico completo: a) Permitido qualquer processo de fabrico; b) Requerida a remoção de material; c) Proibida a remoção de material [20].

### 4.1.4 Símbolo gráfico para “todas as superfícies em volta de um contorno da peça”

Quando é necessário o mesmo acabamento de superfície em todas as superfícies em volta de um contorno da peça, representado no desenho por um contorno fechado da peça de trabalho, um círculo deve ser adicionado ao símbolo gráfico completo (Figura 4.10), tal como mostrado na Figura 4.11:

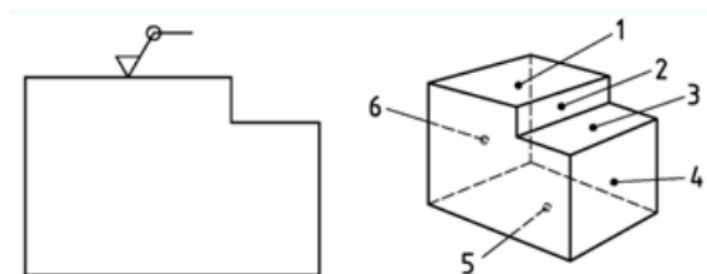


Figura 4.11 - Requisito de acabamento de superfície para todas as seis superfícies representadas pelo contorno da peça [20].

Nota: O contorno no desenho representa as seis superfícies mostradas na representação 3D da peça (as superfícies frontal e traseira não estão incluídas).

## 4.2 Composição do símbolo gráfico completo para os estados de superfície

### 4.2.1 Posição de requisitos complementares de acabamentos de superfície

De acordo com a norma ISO 1302:1978, a indicação das características de acabamento superficial das peças fez-se por meio de um símbolo que tem a forma geral representada na Figura 4.12:

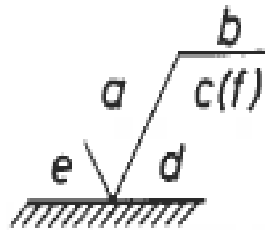


Figura 4.12 - Forma geral do símbolo para a indicação do grau de acabamento superficial [13].

Na figura anteriormente apresentada (Figura 4.12), as letras representadas, correspondentes aos diversos tipos de indicações, têm o seguinte significado:

- a) Posição “a” – Valor da rugosidade  $Ra$  (em  $\mu m$ ) ou classe de rugosidade;
- b) Posição “b” – Tratamentos especiais da superfície;
- c) Posição “c” – Comprimento de base (em mm);
- d) Posição “d” – Direcção das estrias;
- e) Posição “e” – Sobre-espessura para maquinação/acabamento;
- f) Posição “f” – Outros valores da rugosidade além de  $Ra$ .

Actualmente, com base na norma ISO 1302:2002, a indicação das características de acabamento superficial das peças faz-se por meio de um símbolo que tem a forma geral representada na figura seguinte (Figura 4.13):

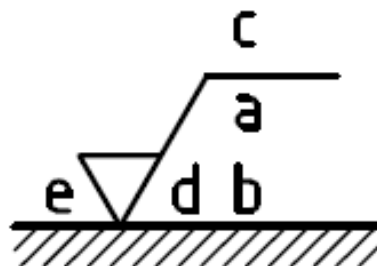


Figura 4.13 - Forma geral do símbolo para a indicação do grau de acabamento superficial [20].

Os requisitos complementares de acabamentos de superfície na forma de:

- i. Parâmetros de acabamentos de superfície,
- ii. Valores numéricos, e

iii. Banda de transmissão/comprimento amostral,

devem situar-se nas posições específicas no símbolo gráfico completo de acordo com o seguinte [20]:

**a) Posição “a” – Requisito único de acabamento de superfície**

Indica a designação do parâmetro de acabamento de superfície e seu valor limite numérico (em  $\mu\text{m}$ ), antecedida da banda de transmissão/comprimento amostral,  $l_r$  (em mm). Para evitar erros de interpretação, deverá ser inserido um espaço duplo entre a designação do parâmetro e o valor limite.

Geralmente, a banda de transmissão ou comprimento amostral deve ser indicada seguido de um traço oblíquo (/), seguido da designação do parâmetro de acabamento de superfície, seguido pelo seu valor numérico utilizando uma sequência de texto.

Exemplo 1: 0,0025-0,8/Rz 6,8 (exemplo com indicação da transmissão de banda).

Exemplo 2: -0,8/Rz 6,8 (exemplo com indicação apenas do comprimento amostral).

**b) Posições “a” e “b” – Dois ou mais requisitos de acabamento de superfície**

Indica o primeiro requisito de acabamento de superfície na posição “a”, tal como referido em a). O segundo requisito de acabamento de superfície deve ser indicado na posição “b”. Caso seja necessário indicar um terceiro (ou mais) requisito, o símbolo gráfico deve ser aumentado em conformidade no sentido vertical, de modo a arranjar espaço para mais linhas.

Exemplo: 0,08-0,25/Ra 5,9

0,08-0,25/Rt 3,6

**c) Posição “c” – Método de fabrico**

Indica o método de fabrico, o tratamento, os revestimentos ou outros requisitos de fabrico, para produzir a superfície (ex.: torneada, rectificada, galvanizada).

**d) Posição “d” – Estrias de superfície e sua orientação**

Indica o símbolo da estria de superfície requerida e a sua orientação.

**e) Posição “e” – Sobre-espessura para maquinaria/acabamento**

Indica a sobre-espessura para maquinaria/acabamento permitida, caso haja, como um valor numérico dado em milímetros (mm).

As alterações que ocorreram na norma são significativas, como se pode constatar. Na norma mais antiga, apenas era exigida a indicação, no desenho técnico, do valor do parâmetro de rugosidade  $R_a$  como valor de referência, ou Classe de Rugosidade. Apenas era indicado o valor de outro parâmetro de rugosidade caso fosse necessário. Actualmente, não é exigida a especificação do parâmetro de rugosidade  $R_a$ , devendo ser indicado o valor do parâmetro de rugosidade que melhor caracteriza a rugosidade tendo em conta a função da peça a produzir. Deixou ainda de existir a possibilidade da especificação através da Classe de Rugosidade. Outra alteração significativa respeita ao facto de actualmente não só se poder indicar o tratamento a que a superfície em causa estará sujeita, como também do seu método de fabrico e o seu revestimento.

### 4.3 Indicação dos parâmetros de acabamento de superfície

A designação do parâmetro e o valor numérico associado, que devem ser indicados, incluem quatro itens de informação essencial para a interpretação do requisito, que são os seguintes:

- i. Qual dos três perfis de superfície ( $R$  - Rugosidade,  $W$ - Ondulação, ou  $P$  – Perfil primário) é indicado;
- ii. Qual a característica (parâmetro) do perfil que é indicada;
- iii. Quantos comprimentos amostrais,  $l_r$ , compõem o comprimento de avaliação,  $l_n$ ;
- iv. Como deve ser interpretado o limite da especificação indicada.

#### 4.3.1 Indicação do comprimento de avaliação, $l_n$

Caso o número de comprimentos amostrais,  $l_r$ , contidos no comprimento de avaliação,  $l_n$ , difira do número de referência de 5, tal deverá ser indicado adjacente à designação do parâmetro relevante [20].

Exemplo:  $Rz3$  ou  $Rp3$  ou  $Ra3$  ou  $Rt3$  ou  $Rv3$  ou  $Rc3$  ou  $RSm3$  (caso seja pretendido um comprimento de avaliação que contenha três comprimentos amostrais).

Se o comprimento de avaliação diferir do número padrão, deve ser indicado entre dois traços oblíquos [20].

Exemplo: 0,008-0,5/12/R 10

#### 4.3.2 Indicação dos limites de tolerância

Existem duas formas distintas de indicar e interpretar os limites de especificação dos acabamentos de superfície [21]:

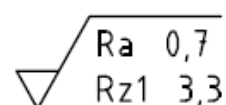
- **Regra dos 16% (regra por omissão)** - Sempre que mais que 16% de todos os valores avaliados, para o parâmetro seleccionado, com base num comprimento de avaliação,

excederem (por defeito e por excesso) o limite definido por  $\mu + \sigma$ , em que  $\mu$  é a média aritmética dos valores avaliados para o parâmetro de rugosidade do perfil seleccionado, e  $\sigma$  é o desvio padrão desses valores, a superfície é considerada como não aceitável (Figura 4.14).

- **Regra do valor máximo** - para os requisitos especificados pelo valor máximo do parâmetro durante a inspecção, nenhum dos valores medidos do parâmetro sobre toda a superfície sob inspecção, deve exceder o valor especificado nos desenhos ou na documentação técnica do produto. De modo a designar o valor máximo admissível para o parâmetro em causa, o índice “*max*” tem que ser adicionado ao símbolo do respectivo parâmetro (por exemplo *Rz1max*) (Figura 4.15).

MRR Ra 0,7; Rz1 3,3

a) No texto

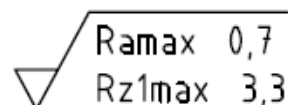


b) No desenho técnico

Figura 4.14 - Indicação do parâmetro onde se aplica a regra dos 16% (com banda de transmissão, por omissão) [20].

MRR Ramax 0,7; Rz1max 3,3

a) No texto



b) No desenho técnico

Figura 4.15 - Indicação do parâmetro onde se aplica a regra do valor máximo (com banda de transmissão, por omissão) [20].

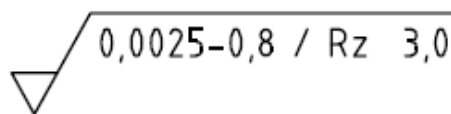
### 4.3.3 Indicação da banda de transmissão/comprimento amostral

O estado de superfície é definido numa banda de transmissão – a gama de comprimentos de onda entre dois filtros definidos. Esta banda é limitada por um filtro que corta os pequenos comprimentos de onda (filtro de onda-curta) e por outro que corta os comprimentos de onda longos (filtro de onda-longa). O valor de corte (“*cut off*”) do filtro de onda-longa é também designado por comprimento amostral, *lr*. Se não for indicada qualquer banda de transmissão, aplica-se a banda de transmissão por omissão. No entanto, como certos parâmetros de acabamento de superfície não têm uma banda de transmissão definida, por omissão, deve especificar-se a banda de transmissão, o filtro de onda-curta ou filtro de onda-longa (comprimento amostral, *lr*), de modo a evitar qualquer ambiguidade. A banda de transmissão/comprimento amostral deve ser indicada através da inclusão dos

valores de *cut off* dos filtros (em milímetros), separados por um hífen (“-”), indicando primeiro o filtro de onda curta, e o filtro de onda longa de seguida (Figura 4.16):

MRR 0,0025-0,8 / Rz 3,0

a) No texto



b) No desenho técnico

Figura 4.16 - Indicação da banda de transmissão conjuntamente com os requisitos de acabamentos superficiais [20].

Em alguns casos, poderá ser relevante indicar apenas um dos dois filtros presentes na banda de transmissão. O segundo filtro, em seguida, tem o seu valor de referência, caso exista. Se apenas for indicado um filtro, o hífen mantém-se, de modo a indicar se a indicação diz respeito ao filtro de onda curta ou longa, como se mostra nos exemplos seguintes. Se não for indicado o limite para o filtro de onda-curta, este tem o valor de  $\lambda_s = 0,008$  mm como referência [20].

Exemplo 1: 0,008- (indicação do filtro de onda curta)

Exemplo 2: -0,25 (indicação do filtro de onda longa)

Valores de *lr* normalizados: ... mm; 0,08 mm; 0,25 mm; 0,8 mm; 2,5 mm; 8,0 mm; ... mm

#### 4.3.4 Tipos de Tolerâncias: Unilateral ou Bilateral

Os requisitos de acabamentos de superfícies devem ser indicados como uma tolerância unilateral ou bilateral. Os limites de tolerância devem ser expressos através da indicação da designação do parâmetro, do valor do parâmetro e pela banda de transmissão. Por omissão, a designação do parâmetro, o seu valor numérico e a banda de transmissão indicados são um limite de tolerância superior unilateral do parâmetro em questão [20].

##### 4.3.4.1 Tolerância Unilateral de um parâmetro de superfície

Aquando a designação do parâmetro, o seu valor e a sua banda de transmissão são indicados, de modo a serem entendidos como um limite superior de tolerância unilateral do parâmetro em questão (regra dos 16% ou regra do valor máximo).

Caso a designação de um parâmetro, o seu valor e a sua banda de transmissão devam ser interpretados como um limite de tolerância unilateral inferior do parâmetro em questão (regra dos 16% ou regra do valor máximo), então a designação de parâmetro deve ser precedida pela letra “L” [20].

Exemplo: L Ra 0,32

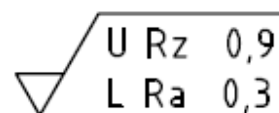


#### 4.3.4.2 Tolerância Bilateral de um parâmetro de superfície

A tolerância bilateral deve ser indicada no símbolo completo, colocando o requisito para os dois limites de tolerância acima um do outro. O limite superior de especificação (regra dos 16% ou regra do valor máximo), precedido pela letra “U” deve ser indicado acima do limite inferior de especificação, precedido pela letra “L” (Figura 4.17). Sempre que os limites superiores e inferiores são expressos pelo mesmo parâmetro com valores limite diferentes, as letras “U” e “L” podem ser omissas desde que a omissão não deixe qualquer dúvida [20].

Os limites superiores e inferiores da especificação não são necessariamente expressos por meio da mesma designação de parâmetro e da banda de transmissão (Figura 4.17) [20] [ISO 1302:2002].

MRR U Rz 0,9; L Ra 0,3



a) No texto

b) No desenho técnico

Figura 4.17 - Especificação bilateral da superfície [20].

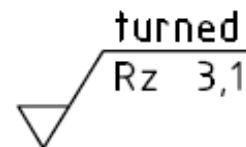
#### 4.4 Indicação do método de fabrico ou de informações relacionadas

O valor do parâmetro de textura de superfície de uma superfície real é fortemente influenciado pela forma detalhada da curva de perfil. A designação de parâmetro, valor do parâmetro e banda de transmissão - indicado unicamente como um requisito de textura da superfície - por conseguinte, não resulta necessariamente em função não ambígua da superfície. Consequentemente, é necessário em quase todos os casos, indicar o processo de fabrico, uma vez que este processo em certa medida, resulta nomeadamente numa forma detalhada da curva de perfil [20].

Também poderá haver outros motivos que se considerem necessários para se efectuar a indicação do processo.

O processo de fabrico especificado para a superfície pode ser apresentado como texto, adicionado ao símbolo gráfico completo, como indicado nas figuras seguintes (Figura 4.18 e Figura 4.19):

MRR turned Rz 3,1

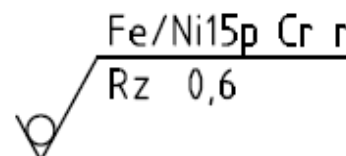


a) No texto

b) No desenho técnico

Figura 4.18 - Indicação do processo de trabalho mecânico (ex.: torneamento) e requisito para rugosidade da superfície resultante [20].

NMR Fe/Ni15p Cr r; Rz 0,6



a) No texto

b) No desenho técnico

Figura 4.19 - Indicação do requisito de rugosidade e revestimento [20].

## 4.5 Indicação das estrias de superfície

A orientação das estrias é a orientação do padrão de superfície prevalecente, determinado pelo processo de fabrico, e correspondente utilizado às marcas deixadas pelas ferramentas durante o fabrico da peça; a orientação das estrias, deve ser indicada no símbolo gráfico completo através da utilização dos símbolos descritos e ilustrados na Tabela 4.2. A indicação das estrias de superfície pelos símbolos definidos (por exemplo, o símbolo de perpendicularidade presente na Figura 4.20) não é aplicável às indicações textuais [20].

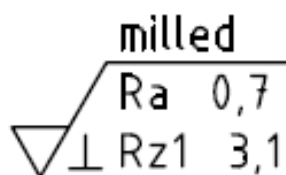
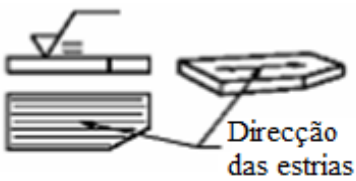
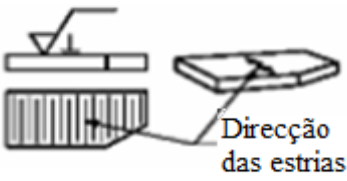
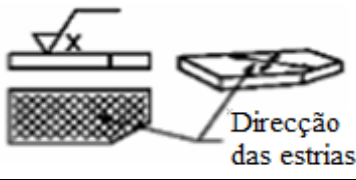



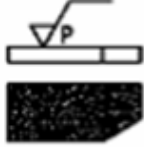


Figura 4.20 - Direcção do padrão das estrias de superfície indicado perpendicularmente ao plano de projecções que contém o requisito de acabamento de superfícies [20].

Nota: A direcção das estrias é a direcção do padrão de superfície predominante, a qual é usualmente determinada pelo processo de fabrico utilizado.

A série de símbolos apresentados na Tabela 4.2 especificam as direcções gerais das estrias de maquinação e sua orientação, relativamente ao plano de desenho que contém os requisitos de acabamento de superfície [20]

Tabela 4.2 - Indicação das estrias de superfície [20].

Símbolo Gráfico	Interpretação e exemplo	
=	Paralelas ao plano de projecção da vista na qual o símbolo é utilizado	
⊥	Perpendiculares ao plano de projecção da vista na qual o símbolo é utilizado	
X	Cruzadas em duas direcções oblíquas relativamente ao plano de projecção da vista na qual o símbolo é utilizado	
M	Multidireccionais	
C	Aproximadamente circulares relativamente ao centro da superfície à qual o símbolo se aplica	
R	Aproximadamente radiais relativamente ao centro da superfície à qual o símbolo se aplica	
P	Estrias particulares, não-direccionais, ou protuberantes	

Nota: Se for necessário especificar um padrão de superfície que não é definido claramente através destes símbolos, tal deve ser conseguido pela adição de uma nota adequada no desenho.

## 4.6 Indicação da sobre-espessura para maquinação/acabamento

Se for necessário prescrever o valor da sobre-espessura de maquinação, ele deverá ser inscrito à esquerda do símbolo, tal como indicado na Figura 4.21. Geralmente, a sobre-espessura para maquinação/acabamento apenas é indicada para os casos em que dois ou mais estádios do processo são exibidos no mesmo desenho (ex.: em desenhos de peças fundidas em bruto ou estampadas, com a peça final mostrada na peça em bruto). Este valor é dado em milímetros ou em polegadas, consoante o sistema de unidades adoptado para a cotação do desenho técnico [20].

A indicação da tolerância admissível com o símbolo definido não é aplicável a indicações textuais. Quando a tolerância admitida é indicada, pode ocorrer que tal seja o único requisito adicionado ao símbolo gráfico completo (Figura 4.21) [20].

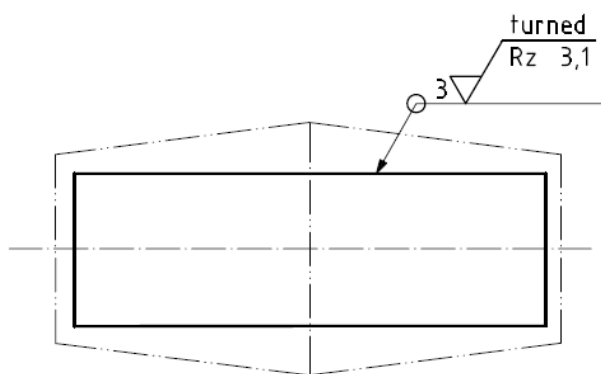


Figura 4.21 - Indicação de requisitos de acabamento superficial para peça a "final" (inclui um requisito para 3 mm de tolerância admissível/sobre-espessura para todas as superfícies) [20].

## 4.7 Inscrição em desenhos e noutra documentação técnica de produtos

Os requisitos de acabamentos superficiais devem ser indicados apenas uma vez para uma determinada superfície e salvo disposição em contrário, a indicação dos requisitos de acabamentos de superfície são aplicáveis para superfícies após maquinação, revestimento, etc [20].

### 4.7.1 Posição e orientação do símbolo gráfico e sua anotação

Sempre que o símbolo gráfico não contenha características especiais do estado de superfície, ou sobre-espessura para maquinação, poderá ser indicado com qualquer orientação. A regra geral é que o símbolo gráfico, juntamente com a informação complementar, deve ser orientado de modo a que possam ser lidos a partir da parte inferior ou lado direito do desenho, de acordo com a norma ISO 129-1 (Figura 4.22) [20].

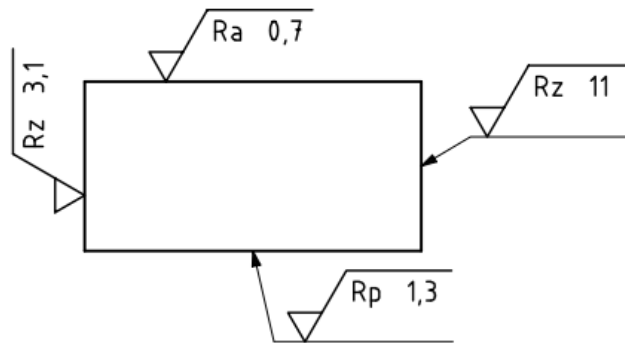


Figura 4.22 - Direcção de leitura dos requisitos de acabamentos de superfície [20].

O requisito de acabamento de superfície (símbolo gráfico) deve tocar a superfície ou estar ligado a esta por meio de uma linha de referência/chamada terminando numa ponta de flecha [20].

Como regra geral, o símbolo gráfico, ou a linha de chamada terminada numa seta (ou outro terminador relevante), deve apontar para a superfície, a partir do lado exterior do material da peça de trabalho, para o contorno (que representa a superfície) ou para a sua extensão (Figura 4.23 e Figura 4.24) [20].

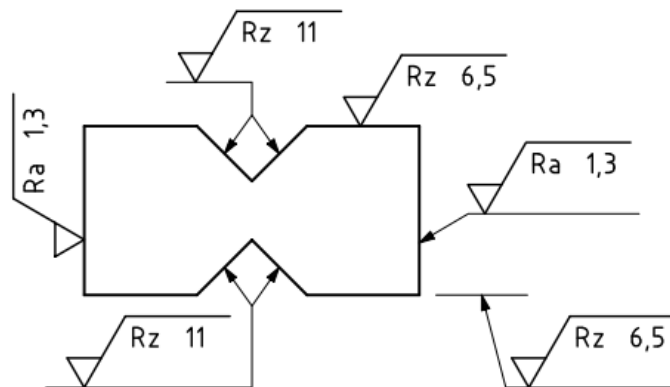


Figura 4.23 - Requisitos de acabamentos de superfície na linha de contorno representando a superfície [20].

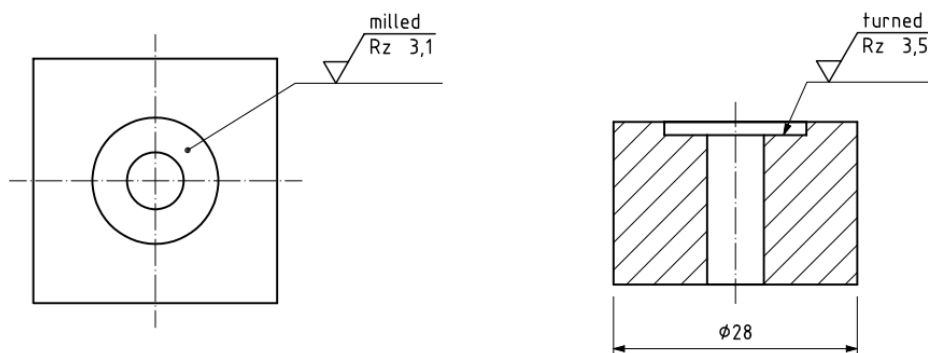


Figura 4.24 - Uso alternativo das linhas de referência e linhas de chamada [20].

Se não existir o risco de erros de interpretação, o requisito de acabamento de superfície pode ser indicado conjuntamente com as dimensões indicadas, como ilustrado na Figura 4.25 [20].

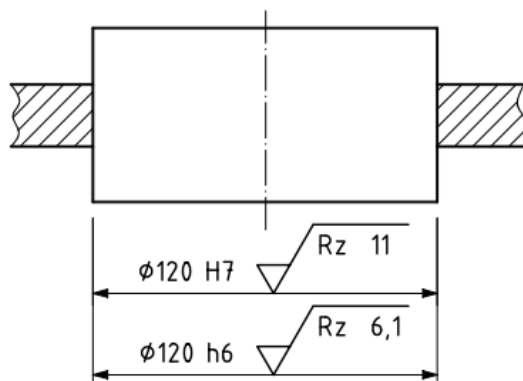


Figura 4.25 - Requisito de acabamento de superfície – cota de elemento [20].

#### 4.7.1.1 Superfícies cilíndricas ou prismáticas

Em conformidade com o princípio geral de cotagem, o símbolo gráfico aparece apenas uma vez para cada superfície, e, sempre que possível, na vista em que está representada a cota da dimensão mais relevante.

Superfícies cilíndricas, bem como prismáticas podem ser especificadas apenas uma vez, se indicadas por uma linha de centro (“*centreline*”) e se cada face da superfície prismática tiver o mesmo requisito para acabamento de superfície (Figura 4.26). Contudo, cada superfície prismática deve ser indicada separadamente se diferentes acabamentos de superfície forem requeridos em superfícies prismáticas individuais (Figura 4.27) [20].

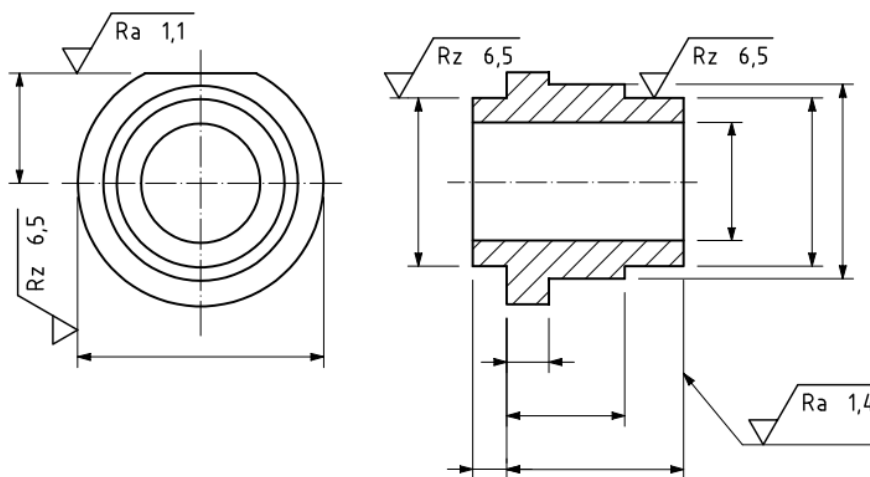


Figura 4.26 - Requisitos de acabamentos de superfície sobre linhas de chamada [20].

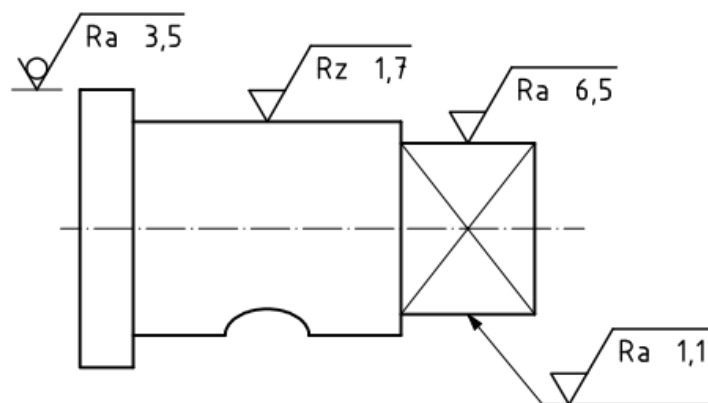


Figura 4.27 - Requisitos de acabamentos de superfície - superfícies cilíndricas e prismáticas [20].

Se o mesmo acabamento de superfície é exigido para todas as superfícies de uma peça de trabalho, este requisito de acabamento de superfície deve ser colocado perto do bloco de título do desenho técnico [20].

O símbolo gráfico geral correspondente a esse acabamento de superfície deve ser seguido de:

- i. Um símbolo gráfico básico entre parênteses, sem qualquer outra indicação, significando que outros irão aparecer no desenho técnico (Figura 4.28) ou
- ii. Outros símbolos gráficos entre parênteses, que correspondem aos demais que aparecem no desenho técnico (Figura 4.29).

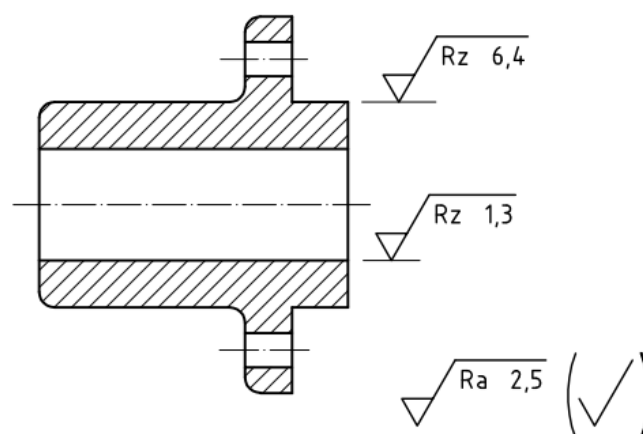


Figura 4.28 - Indicação simplificada - Maioria das superfícies com o mesmo requisito de acabamento de superfície [20].

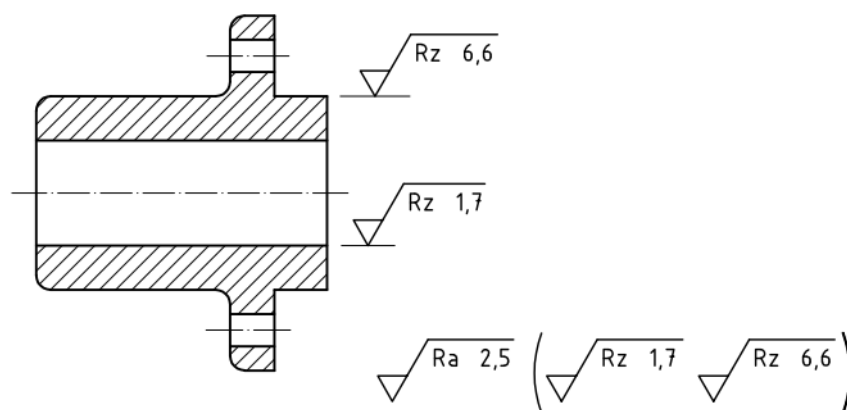


Figura 4.29 - Indicação simplificada - Maioria das superfícies com o mesmo requisito de acabamento de superfície [20].

Requisitos de acabamentos de superfície que se afastem do requisito geral de acabamento de superfície devem ser indicados directamente no desenho técnico, na mesma vista que as superfícies particulares em questão (Figura 4.28 e Figura 4.29) [20].

#### 4.7.1.2 Requisitos comuns em múltiplas superfícies

De modo a evitar a necessidade de repetição de uma indicação complexa várias vezes, ou em situações onde o espaço disponível é limitado, ou se o mesmo acabamento de superfície é necessário num elevado número de superfícies da peça de trabalho, uma indicação de referência simplificada pode ser invocada como se segue:

##### 4.7.1.2.1 Indicação por símbolo gráfico com letras

A indicação de referência simplificada pode ser utilizada sobre a superfície, desde que o seu significado seja explicado perto da peça de trabalho em questão, perto do bloco de título ou no espaço destinado a notas gerais (Figura 4.30)

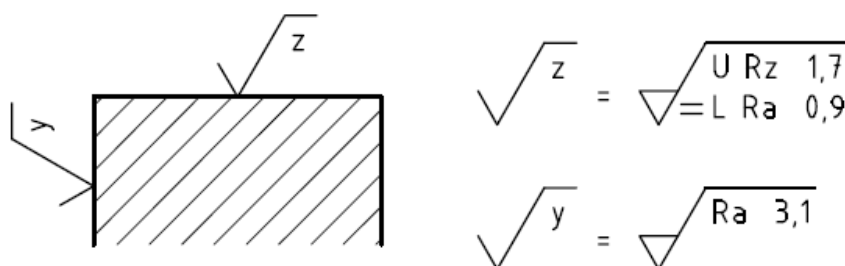


Figura 4.30 – Indicação de referência em caso de espaço limitado para inscrição no desenho técnico [20].



#### 4.7.1.2.2 Indicação por símbolo gráfico único

O correspondente símbolo gráfico evidenciado em Figura 4.8 e Figura 4.9, deve ser utilizado numa superfície apropriada e o seu significado expresso no desenho técnico, como é exemplificado da Figura 4.31 a Figura 4.33:



Figura 4.31 - Indicação simplificada de requisitos de acabamentos de superfície - Processo de fabrico não especificado [20].



Figura 4.32 - Indicação simplificada de requisitos de acabamentos de superfície - Remoção de material requerida [20].



Figura 4.33 - Indicação simplificada de requisitos de acabamentos de superfície - Remoção de material proibida [20].

#### 4.7.2 Indicação de dois ou mais métodos de fabrico

Se for necessário definir o acabamento de superfície quer antes quer após o tratamento, este deve ser explicado numa nota ou em concordância com a Figura 4.34:

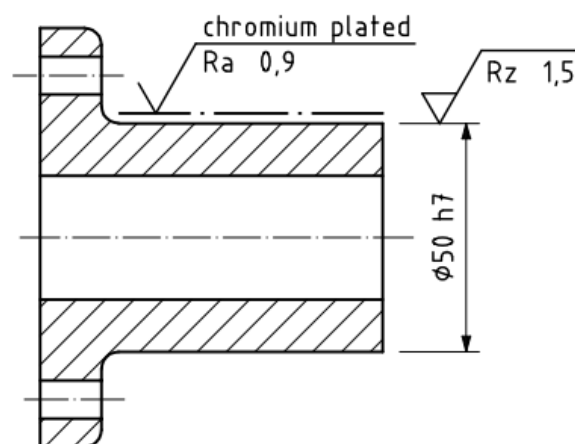


Figura 4.34 - Indicação de requisitos de acabamento de superfície antes e após tratamento (revestimento neste caso) [20].

Nos desenhos técnicos, o acabamento das superfícies pode ser indicado pela rugosidade média, consoante o processo de fabrico utilizado para a obtenção da peça final. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores de rugosidade média típicos para os diversos processos de fabrico [14].

Tabela 4.3 - Diferentes valores de rugosidade média consoante o processo de fabrico [14].

Dimensões	Função das superfícies	sem contacto		contacto fixo		centragem contacto móvel guiamento			estanquidade trajectória precisa				
	Natureza das superfícies	bruta		precisão média		boa precisão			precisão elevada				
	Qualidade IT	16-15-14-13-12		11-10-9		8-7-6			5-4-3-2-1-0-01				
Rugosidade	Aspecto	mate		semi mate			brilhante			espelhado			
	Símbolos antigos	~		▽		▽▽			▽▽▽				
	Qualidade	grosseira		média			fina			Muito fina			
	Nº classe (ISO 1302)	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1	
	Rt (µm)	120	55	27	12	5.7	2.8	1.4	0.6	0.25	0.1	0.05	
	Ra (µm)	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	
Fundição em areia													

Em anexo (Anexos I e II) são apresentados exemplos de aplicação da norma ISO 1302:2002, bem como sobre quais as indicações mínimas a ter em consideração para um controlo não ambíguo de funções da superfície.

## 5 Parâmetros de Rugosidade

Os acabamentos superficiais estão directamente relacionados com o grau de qualidade do acabamento exigido para as superfícies. Do ponto de vista de fabrico e de funcionamento, pode-se afirmar que a superfície ideal é aquela que satisfaz os requisitos funcionais exigidos. Daqui se depreende a importância de que os valores dos parâmetros de rugosidade estejam dentro das tolerâncias especificadas e que estas sejam as mesmas quer para os fabricantes quer para os clientes ou utilizadores desses materiais. A solução para o problema de controlo de qualidade de superfícies envolve aspectos como: a determinação dos parâmetros de rugosidade que são referência para a utilização funcional do material produzido (por exemplo, se para contactos estáticos ou dinâmicos) e o manter de exactidão e concordância entre os vários instrumentos de medição utilizados. A especificação metrológica dos parâmetros de rugosidade é apresentada na norma técnica ISO 4287:1997 – *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile Method – Terms, definitions and surface texture parameters* especifica os termos, definições e parâmetros para a determinação da textura de superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário) por perfilometria [22].

### 5.1 Termos gerais

**Filtro do perfil** – Filtro que separa o perfil em componentes de grande comprimento de onda e pequeno comprimento de onda.

**Filtro do perfil,  $\lambda_c$**  – Filtro que define a separação entre componentes de rugosidade e ondulação (Figura 5.1).

**Filtro do perfil,  $\lambda_s$**  – Filtro que define a separação entre os componentes de rugosidade e os componentes de comprimento de onda mais pequenos presentes na superfície (Figura 5.1).

**Filtro do perfil,  $\lambda_f$**  – Filtro que define a separação entre a ondulação e os componentes de comprimento de onda maiores presentes na superfície (Figura 5.1).

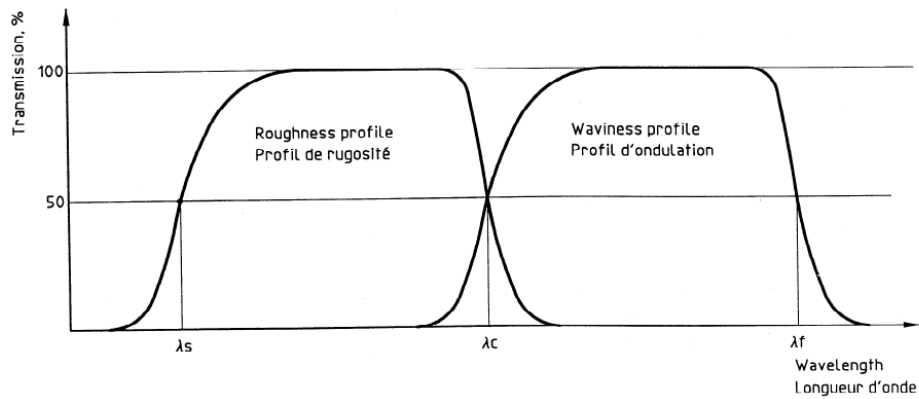


Figura 5.1 - Transmissão característica de perfis de rugosidade e ondulação [22].

**Perfil Primário** – Perfil total após a aplicação do filtro de perfil  $\lambda_s$ .

**Perfil de Rugosidade** – Perfil proveniente do perfil primário suprimindo as componentes de grande comprimento de onda, usando o filtro do perfil  $\lambda_c$ . O perfil de Rugosidade é a base para a avaliação dos parâmetros de rugosidade.

**Perfil de Ondulação** – Perfil derivado do perfil primário por aplicação sucessiva dos filtros do perfil  $\lambda_f$  e  $\lambda_c$ , suprimindo os componentes de grande comprimento de onda usando o filtro de perfil  $\lambda_f$  e suprimindo os componentes de comprimento de onda pequenos usando o filtro do perfil  $\lambda_c$ . O perfil de Ondulação é a base para a avaliação dos parâmetros de ondulação.

**Parâmetro P** – Parâmetro calculado a partir do perfil primário.

**Parâmetro W** – Parâmetro calculado a partir do perfil de ondulação.

**Parâmetro R** – Parâmetro calculado a partir do perfil de rugosidade.

**Pico do perfil** – Uma porção do perfil avaliado dirigida para o exterior (a partir do material para o meio circundante), fazendo a ligação de dois pontos adjacentes da intersecção do perfil com o eixo-X (Figura 5.2).

**Vale do perfil** - Uma porção do perfil avaliado dirigida para o interior (a partir do material para o meio circundante), fazendo a ligação de dois pontos adjacentes da intersecção do perfil com o eixo-X (Figura 5.2).

**Elemento do perfil** – Pico do perfil e o vale do perfil adjacente (Figura 5.2).

**Valor da ordenada ( $Z(x)$ )** – Altura do perfil avaliada em qualquer posição  $x$ .

**Altura do pico do perfil ( $Z_p$ )** – Distância entre o ponto mais alto do pico do perfil e o eixo-X (Figura 5.2).

**Profundidade do vale do perfil ( $Z_v$ )** – Distância entre o ponto mais baixo do vale do perfil e o eixo-X (Figura 5.2).

**Altura do elemento do perfil ( $Z_t$ )** – Soma da altura do pico e profundidade do vale sucessivos de um elemento do perfil (Figura 5.2).

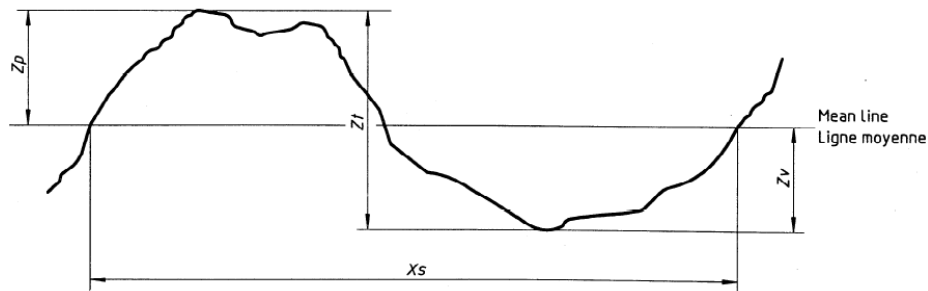


Figura 5.2 - Elemento do perfil [22].

Em engenharia, a textura das superfícies pode ser obtida por uma grande variedade de processos, os quais conduzem a diferentes acabamentos de superfície. Estes, podem ser classificados segundo a Amplitude (medida das características verticais dos desvios de superfície), o Espaçamento (medido das características horizontais dos desvios de superfície) ou Híbridos (combinação de ambos) (Figura 5.3).

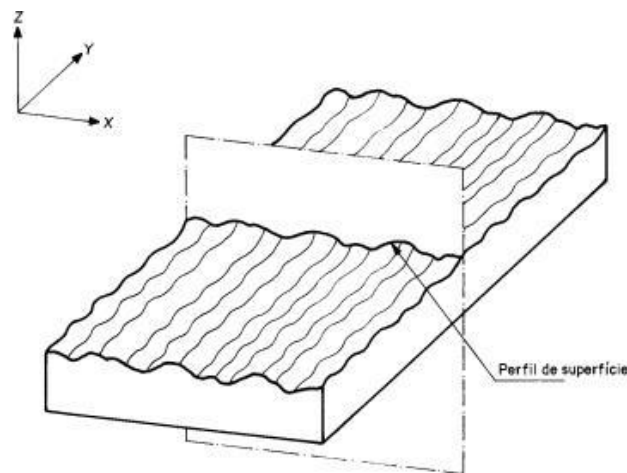


Figura 5.3 - Perfil da superfície [22].

### **Comprimento amostral ( $l_r$ )**

Comprimento, na direcção do eixo-X, utilizado para identificar as irregularidades que caracterizam o perfil a avaliar [23].

O comprimento amostral para os perfis de rugosidade,  $l_r$ , é numericamente igual ao comprimento de onda característico,  $\lambda_c$  [23]. O comprimento amostral para o perfil primário,  $l_p$ , é igual ao comprimento de avaliação (Figura 5.4) [23].

#### Comprimento de avaliação ( $l_n$ )

Comprimento, na direcção do eixo-X, usado para obter o perfil a avaliar [23].

O comprimento de avaliação pode conter um ou mais comprimentos amostrais (tipicamente contém 5 comprimentos amostrais) (Figura 5.4) [23].

#### Comprimento total de medição ( $l_t$ )

É composto por 7 comprimentos amostrais (Figura 5.4) [23].

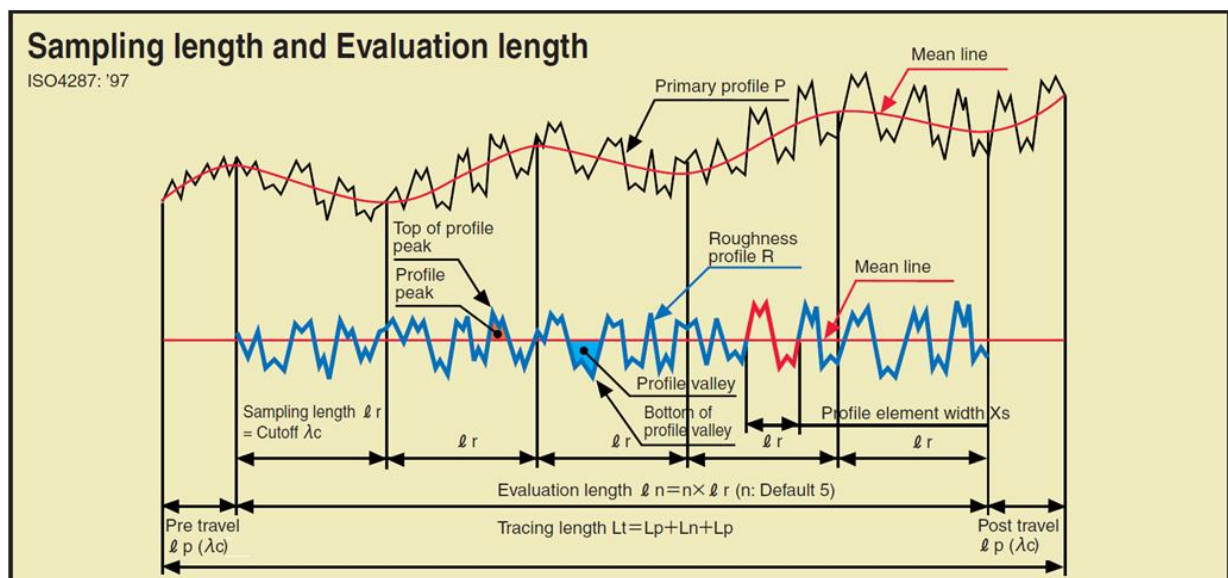


Figura 5.4 - Comprimento amostral e Comprimento de avaliação [23].

## 5.2 Parâmetros de Amplitude

#### Altura máxima dos picos do perfil ( $R_p$ )

Altura máxima dos picos do perfil, de altura  $Z_p$ , compreendidos no comprimento amostral (Figura 5.5).

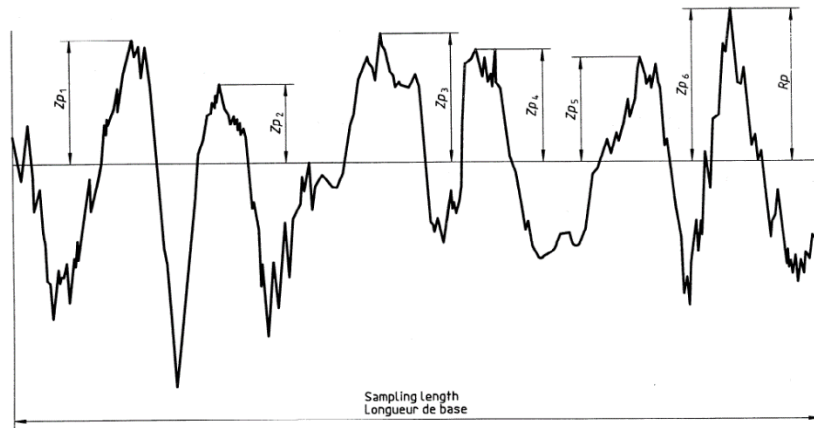


Figura 5.5 - Altura máxima dos picos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade) [22].

### Profundidade máxima dos vales do perfil ( $R_v$ )

Maior profundidade dos vales do perfil,  $Z_v$ , compreendidos no comprimento amostral (Figura 5.6).

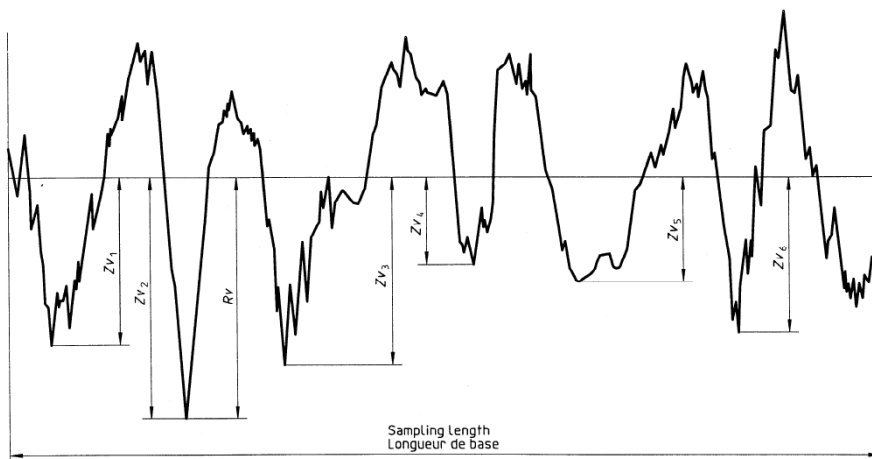


Figura 5.6 - Profundidade máxima dos vales do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade) [22].

### Altura máxima do perfil ( $R_z$ ) – definido em $l_r$

Soma da altura máxima dos picos do perfil,  $Z_p$ , com a profundidade máxima dos vales do perfil,  $Z_v$ , compreendidos no comprimento amostral,  $l_r$  (Figura 5.7; Equação 5.1).

$$R_z = Z_p + Z_v \quad \text{Equação 5.1}$$

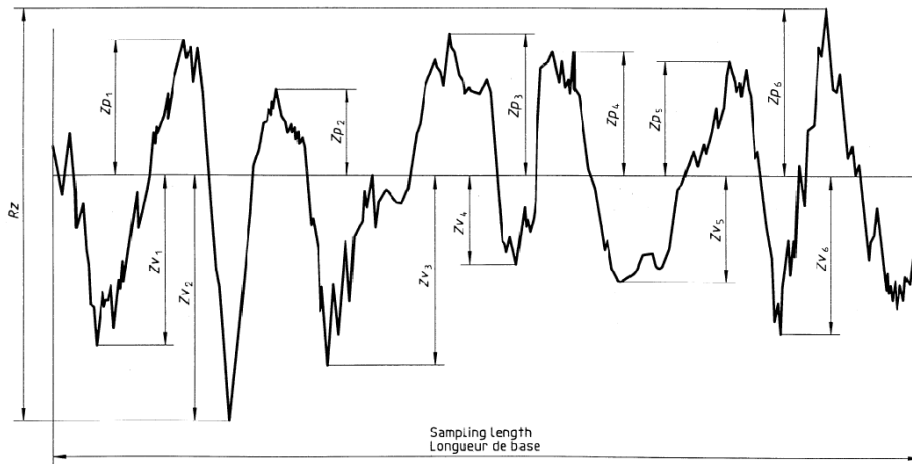


Figura 5.7 - Altura máxima do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade) [22].

### Altura total do perfil de rugosidade ( $R_t$ ) – definido em $l_n$

De acordo com a norma ISO 4287:1997, é definida como sendo a soma da maior das alturas de pico do perfil,  $Z_p$ , com a maior das profundidades de vale do perfil,  $Z_v$ , no interior do comprimento de avaliação,  $l_n$  (Figura 5.8, Equação 5.2) [22].

$$R_t = Z_{p_{\max}} + Z_{v_{\max}} \quad \text{Equação 5.2}$$

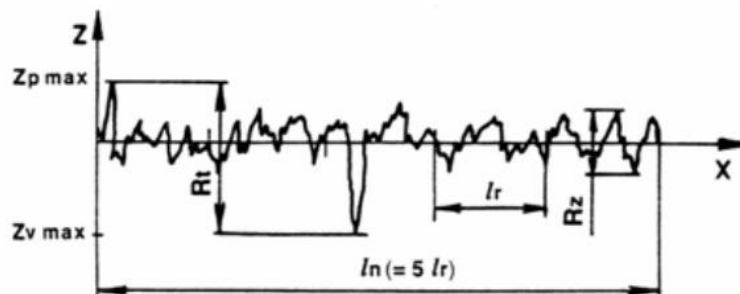


Figura 5.8 - Parâmetros  $R_t$  e  $R_z$  [23].

Nota: Como  $R_t$  é definido em relação ao comprimento de avaliação, o que se segue é sempre válido para qualquer perfil (Equação 5.3) [23]:

$$R_t \geq R_z \quad \text{Equação 5.3}$$

### Altura média dos elementos do perfil ( $R_c$ )

Corresponde ao valor médio das alturas dos elementos do perfil,  $Z_t$ , compreendidas no comprimento amostral (Figura 5.9, Equação 5.4).



$$Rc = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Zt_i \quad \text{Equação 5.4}$$

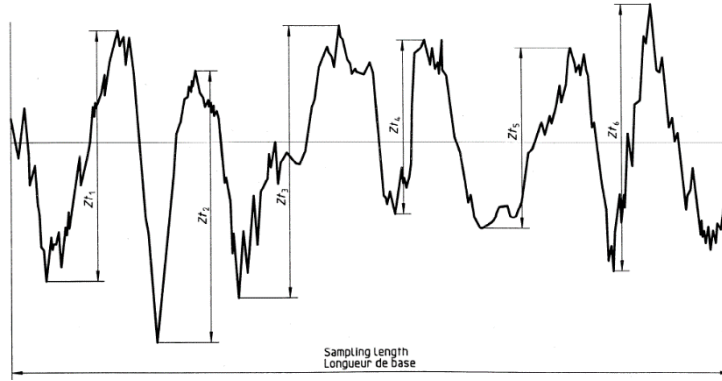


Figura 5.9 - Altura dos elementos do perfil (exemplo de um perfil de rugosidade) [22].

#### **Assimetria do perfil avaliado ( $Rsk$ )**

Quociente da média do cubo dos valores das ordenadas,  $Z(x)$ , e o cubo de  $Rq$  (Equação 5.5) [22].

$$Rsk = \frac{1}{Rq^3} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^3(x) dx \right] \quad \text{Equação 5.5}$$

#### **Curtose (*kurtosis*) do perfil avaliado ( $Rku$ )**

Quociente da média dos valores elevados à potência de quatro dos valores das ordenadas,  $Z(x)$ , e o valor da quarta potência do parâmetro  $Rq$ , compreendidos no comprimento amostral (Equação 5.6) [22].

$$Rku = \frac{1}{Rq^4} \left[ \frac{1}{lr} \int_0^{lr} Z^4(x) dx \right] \quad \text{Equação 5.6}$$

#### **Desvio médio aritmético do perfil avaliado ( $Ra$ )**

Média aritmética dos valores absolutos das coordenadas do perfil, em que  $c$  é o comprimento de base (Figura 5.10, Equação 5.7) [14]:

$$Ra = \frac{1}{c} \int_0^c |Z(x)| dx \quad \text{Equação 5.7}$$

### Desvio quadrático médio do perfil avaliado ( $Rq$ )

Raíz quadrada da média aritmética dos valores quadráticos das coordenadas do perfil, em que  $c$  é o comprimento de base (Figura 5.10; Equação 5.8) [14]:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{c} \int_0^c Z^2(x) dx} \quad \text{Equação 5.8}$$

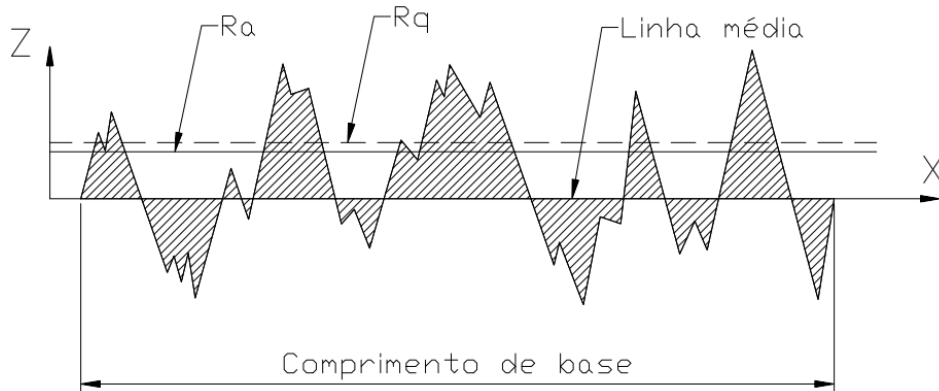


Figura 5.10 - Parâmetros de rugosidade  $Ra$  e  $Rq$  [14].

Nota: Na figura anteriormente apresentada e nas Equação 5.7 e Equação 5.8,  $c$  (comprimento de base) é equivalente a  $lr$  (comprimento amostral).

Na Figura 5.10 assinala-se a *linha média do perfil*, que é a linha cuja forma corresponde ao perfil da peça tal como é definido pelo desenho ou pelo processo de fabricação sem a consideração de erros de forma e de rugosidade e cuja posição é tal que as áreas totais tracejadas da figura acima e abaixo da linha média são iguais [13]. A altura média das irregularidades é definida pelo valor médio das ordenadas do perfil em relação à linha média e é uma medida de rugosidade que é costume representar por  $Ra$  e designar por *valor da rugosidade* [13]. A determinação da linha média, e consequentemente da rugosidade da superfície caracterizado por  $Ra$ , é feito a partir da fixação de um determinado *comprimento de base*  $c$  (Figura 5.10) que se pode definir como o comprimento do perfil da superfície escolhido para avaliar a rugosidade da superfície [13].

### 5.3 Parâmetros de Espaçamento

#### Largura média dos elementos do perfil ( $RS_m$ ):

Valor médio da largura dos elementos do perfil,  $Xs$ , compreendidos no comprimento amostral (Figura 5.11; Equação 5.9) [22]:

$$RS_m = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Xs_i \quad \text{Equação 5.9}$$

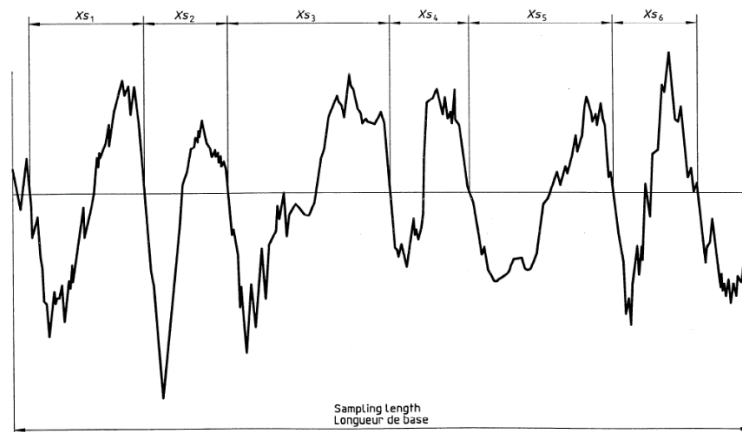


Figura 5.11 - Largura dos elementos do perfil [22].

### 5.4 Parâmetros Híbridos

#### Declive quadrático médio do perfil avaliado ( $RAq$ ):

Valor quadrático médio dos declives locais,  $\frac{dZ}{dx}$ , compreendidos no comprimento amostral (Figura 5.12) [22]:

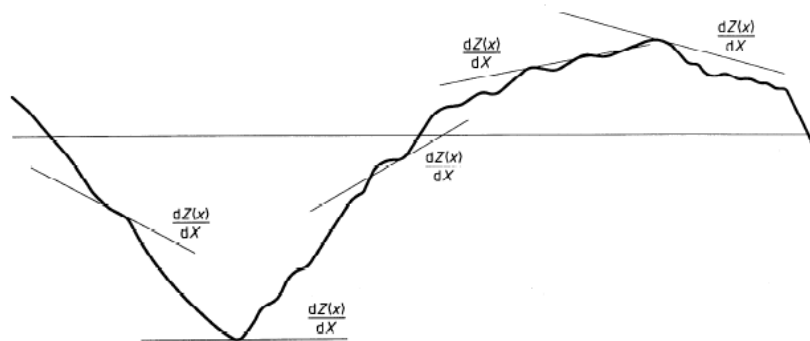


Figura 5.12 - Inclinações locais [22].

## 5.5 Parâmetros de Rugosidade normalmente utilizados para identificar o padrão de medição (valor nominal)

A definição do estado de superfície é um processo complicado, pois são numerosos os parâmetros envolvidos, tal como foi referido anteriormente. No entanto, uma superfície é, regra geral, caracterizada pelos parâmetros de rugosidade mais comuns, nomeadamente:

- **$R_a$  (Desvio médio aritmético do perfil avaliado)**

Este parâmetro é o mais utilizado na medição do acabamento de superfície. O seu método de visualização é o seguinte (Figura 5.13):

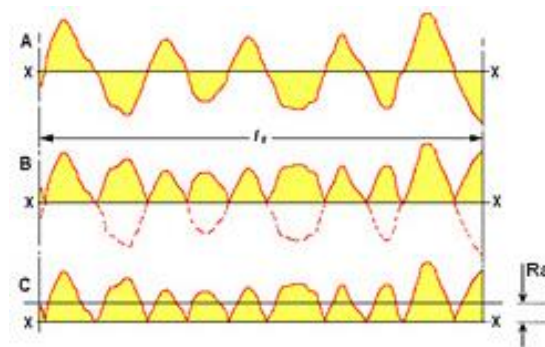


Figura 5.13 - Parâmetro de amplitude,  $R_a$  [23].

Legenda:

- Gráfico A: A linha média XX é ajustada aos dados de medição.
- Gráfico B: As parcelas do perfil dentro do comprimento amostral " $l$ " abaixo da linha média são invertidas e colocada acima da linha.
- Gráfico C:  $R_a$  é a média da altura do perfil por cima da linha média original.

O parâmetro  $R_a$  é o parâmetro de medição mais utilizado mundialmente, sendo aplicável à maioria dos processos de fabrico. Devido à sua elevada utilização, quase a totalidade dos equipamentos apresenta este parâmetro. Contudo, num comprimento amostral, o valor de  $R_a$  representa a média da rugosidade, e portanto, caso um pico ou um vale atípico esteja presente na superfície, o valor da rugosidade média não sofrerá grande alteração, ocultando assim tal defeito. O valor de  $R_a$  não define a forma das irregularidades do perfil, ou seja, pode-se ter um mesmo valor de  $R_a$  para superfícies obtidas por diferentes processos de fabrico. Apesar das limitações referidas anteriormente,  $R_a$  é um parâmetro que permite diferenciar perfis de rugosidade característicos [24].

É utilizado fundamentalmente nos seguintes casos [24]:

- i. No controlo de um processo produtivo onde podem ocorrer mudanças graduais no acabamento superficial, resultantes do desgaste da ferramenta de corte;

- ii. Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos das operações de maquinar bem orientados (torneamento, fresagem, etc...);
- iii. Em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins estéticos.

- **$R_z$  (Altura máxima do perfil)**

É um parâmetro de fácil obtenção em equipamentos de medição actuais, podendo ser utilizado nos seguintes casos [24]:

- i. Em superfícies em que os defeitos isolados não têm influência na função da peça a ser controlada (por exemplo: superfícies de apoio e deslizamento, em ajustamentos apertados, etc...);
- ii. Em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido.

- **$R_q$  (Desvio quadrático médio do perfil avaliado)**

O parâmetro  $R_q$  é utilizado em superfícies onde o seu acabamento apresenta as marcas de maquinagem bem definidas (torneamento, fresagem, etc...) e em superfícies onde o parâmetro  $R_a$  apresenta pouca resolução. No caso de superfícies onde a detecção de picos ou vales se torna importante e mesmo quando estes aparecem ao acaso, evidencia-os mais que o parâmetro  $R_a$ , uma vez que eleva o erro ao quadrado, acentuando-o portanto [24].

Contudo, este parâmetro é pouco utilizado e mais difícil de obter graficamente do que o parâmetro  $R_a$ . Tal como o parâmetro  $R_a$ , o parâmetro  $R_q$  não define a forma das irregularidades, pelo que sempre que apresentado deve vir acompanhado do parâmetro  $R_t$ .

## **5.6 Padrões de Medição**

Um padrão de medição é uma realização da definição duma dada grandeza, com um valor determinado e uma incerteza de medição associada, utilizada como referência [1].

Um padrão de medição serve frequentemente de referência na obtenção de valores medidos e incertezas de medição associadas para outras grandezas da mesma natureza, estabelecendo assim uma rastreabilidade metrológica através da calibração de outros padrões de medição, instrumentos de medição ou sistemas de medição [1].

Os padrões de rugosidade, de acordo com as características são englobados em cinco tipos (Tabela 5.1):

Tabela 5.1 - Tipos e aplicações de Padrões de rugosidade [25].

Padrão de rugosidade	
Tipo	Característica/especificação/aplicação
A	<i>“Depth measurement standard”</i>
B	<i>“Tip condition measurement standard”</i>
C	<i>“Spacing measurement standard”</i>
D	<i>“Roughness measurement standard”</i>
E	<i>“Profile coordinate measurement standard”</i>

- **Padrões Tipo A – “Depth measurement standard”**

Estes Padrões de Medição são utilizados para calibrar a componente vertical do perfil dos instrumentos “stylus” [25].

- **Padrões Tipo A1 – “Wide grooves with flat bottoms” (Entalhes largos com fundo plano)**

Estes padrões de medição têm num plano de topo um sulco de largura conhecida com um fundo plano, ou uma série de sulcos separados, com profundidades/alturas iguais ou diferentes. Cada sulco é suficientemente largo para ser insensível à forma ou condição do instrumento “stylus”. Os sulcos com fundos planos são caracterizados pela sua largura,  $W$ , e pela sua profundidade,  $d$  (Figura 5.14) [25].

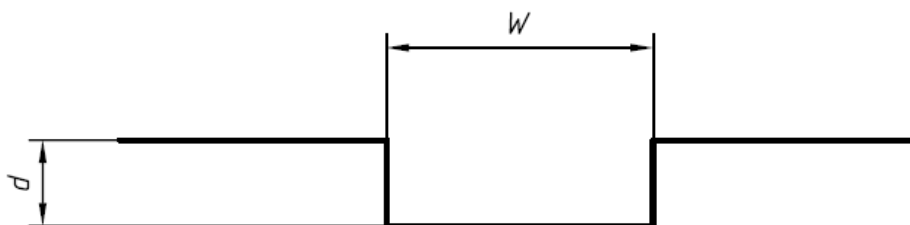


Figura 5.14 - Padrão de Medição Tipo A1 [25].

- **Padrões Tipo A2 – “Wide grooves with rounded bottoms”** (Sulcos largos com fundos arredondados)

Estes padrões de medição são semelhantes aos padrões de medição tipo A1, com exceção dos sulcos, que têm fundos arredondados com um raio suficiente para ser insensível à forma ou condição do instrumento “*stylus*”. Os sulcos largos com fundos arredondados sobre estes padrões de medição são caracterizados pelo seu raio,  $r$ , e pela sua profundidade,  $d$ , (Figura 5.15) [25].

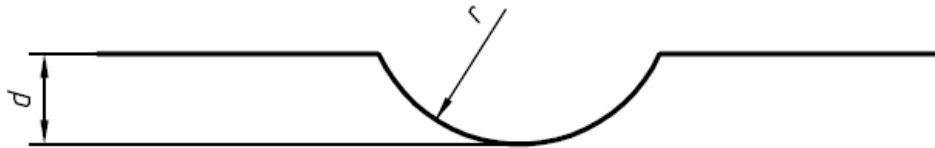


Figura 5.15 - Padrão de Medição Tipo A2 [25].

- **Padrões Tipo B – “Tip condition measurement standard”**

Estes padrões de medi o são utilizados principalmente para calibrar a extremidade do “*stylus*” [25].

- **Padrões Tipo B1**

Estes padrões de medi o são caracterizados por possuir um sulco estreito, ou um número de sulcos separados, com dimensão adequada para serem cada vez mais sensíveis às dimensões da extremidade do “*stylus*” [25].

- **Padrões Tipo B2**

Estes padrões de medi o têm dois tipos de sulcos com valores de  $Ra$  nominalmente iguais, sendo um deles sensível e outro insensível às dimensões da extremidade do “*stylus*”. Estes padrões de medi o têm dois ou mais tipos de sulcos formados sobre uma base comum [25].

- **“Sensitive groove pattern” (Padrão de sulcos sensíveis)**

Sulcos triangulares is celes com picos e vales pontiagudos, com  $RSm$  e ângulo  $\alpha$  proporcionados de modo que o valor de  $Ra$  dependa do tamanho da extremidade do “*stylus*” (Figura 5.16) [25].

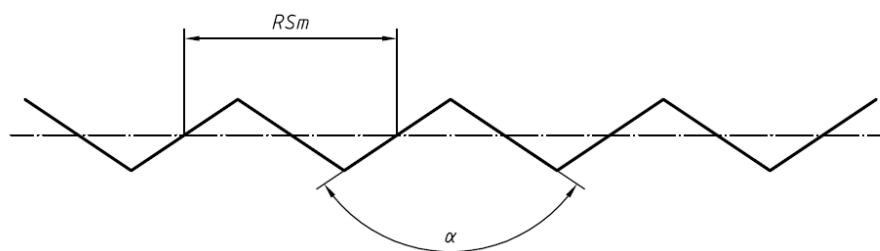


Figura 5.16 - Padrão de Medi o Tipo B2 (Padrão de sulcos sensíveis) [25].

ii. ***“Insensitive groove pattern”*** **“(Padrão de sulcos insensíveis)”**

São sulcos aproximadamente sinusoidais ou arqueados, proporcionados de modo a que  $Ra$  seja substancialmente independente da extremidade do “stylus” (Figura 5.17) [25].

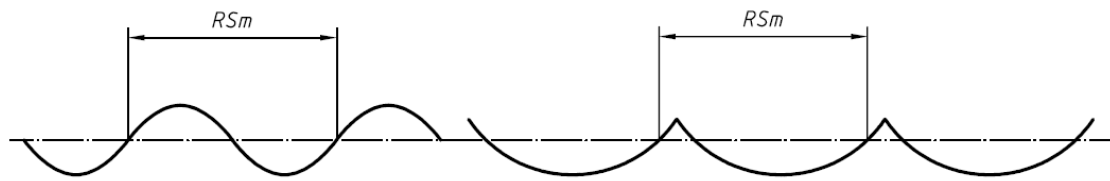


Figura 5.17 - Padrão de Medição Tipo B2 (Padrão de sulcos insensíveis) [25].

- **Padrões Tipo C - *“Spacing measurement standard”***

Padrões utilizados para a calibração das componentes verticais do perfil. Também podem ser utilizados para a calibração das componentes horizontais do perfil, isto se o espaçamento entre os sulcos estiver compreendido entre os limites aceitáveis para este fim. O padrão é formado por um conjunto de sulcos sinusoidais, triangulares ou arqueados [25].

- **Padrões Tipo C1 – *“Grooves having a sine wave profile”*** (Sulcos com um perfil de onda sinusoidal)

Estes padrões de medição são caracterizados por  $RSm$  e  $Ra$ . Os valores devem ser escolhidos de tal modo que a atenuação pelo “stylus” ou filtro é insignificante (Figura 5.18) [25].

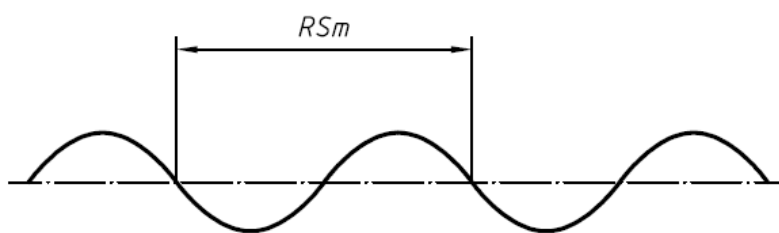


Figura 5.18 - Padrão de Medição Tipo C1 [25].

- **Padrões Tipo C2 – *“Grooves having an isosceles triangular profile”*** (Sulcos com um perfil triangular isósceles)

Estes padrões de medição são caracterizados por  $RSm$  e  $Ra$ . Os valores devem ser escolhidos de tal modo que a atenuação pelo “stylus” ou filtro é insignificante (Figura 5.19) [25].



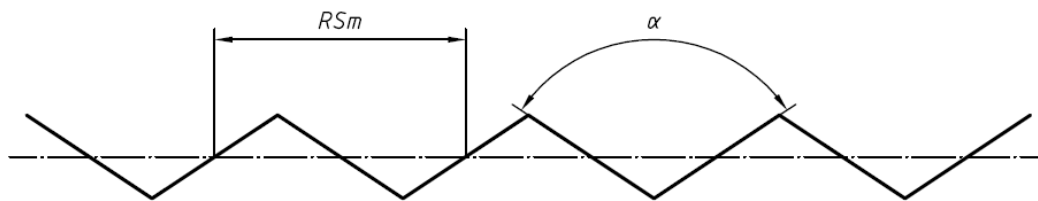


Figura 5.19 - Padrão de Medição Tipo C2 [25].

- **Padrões Tipo C3 – “Simulated sine wave grooves”** (Sulcos simulados de ondas sinusoidais)

Estes padrões de medição são caracterizados por  $Rsm$  e  $Ra$ . Estes são ondas sinusoidais simuladas, que incluem perfis triangulares com picos e vales arredondados ou truncados (Figura 5.20) [25].

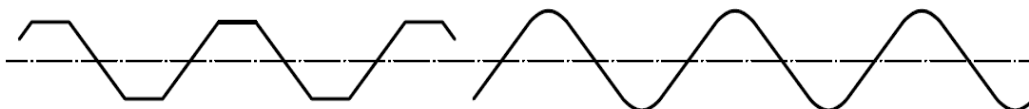


Figura 5.20 - Padrão de Medição Tipo C3 [25].

- **Padrões Tipo C4 – “Grooves having an arcuate profile”** (Sulcos contendo um perfil arqueado)

Estes padrões de medição são caracterizados por  $PSm$  e  $Pa$ . Os valores devem ser escolhidos de tal modo que a atenuação pelo “stylus” ou filtro é insignificante (Figura 5.21) [25].

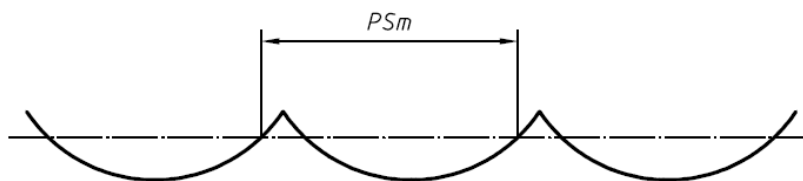


Figura 5.21 - Padrão de Medição Tipo C4 [25].

- **Padrões Tipo D - “Roughness measurement standard”**

Estes Padrões de Medição destinam-se à calibração completa dos instrumentos de medição das rugosidades. O padrão é formado por conjuntos de sulcos irregulares [25].

- **Padrões Tipo D1 - “Unidirectional irregular profiles” (Perfil irregular unidireccional)**

Estes padrões de medição são caracterizados por  $Ra$  e  $Rz$ , têm perfis irregulares na direcção de avanço e têm a vantagem de na secção transversal, isto é, na direcção perpendicular à direcção de deslocamento, serem aproximadamente constantes, repetindo-se a cada  $5\lambda c$  na direcção longitudinal do padrão de medição (Figura 5.22) [25].

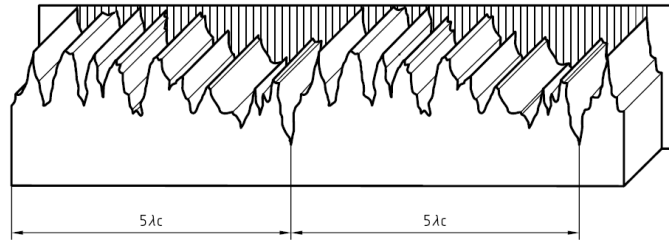


Figura 5.22 - Padrão de Medição Tipo D1 [25].

- **Padrões Tipo D2 - “Circular irregular profile” (Perfil irregular circular)**

Estes padrões de medição são caracterizados por  $Ra$  e  $Rz$ , têm perfis irregulares na direcção de avanço, sendo que na sua secção transversal são aproximadamente constantes, repetindo-se a cada  $5\lambda c$  na direcção circunferencial do padrão de medição (Figura 5.23) [25].

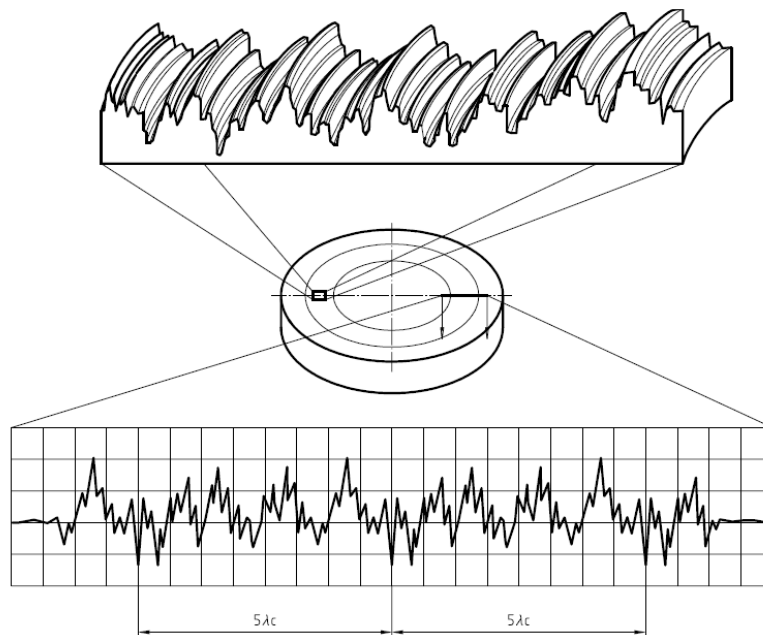


Figura 5.23 - Padrão de Medição Tipo D2 [25].

- **Padrões Tipo E - “*Profile coordinate measurement standard*”**

Estes padrões de medição são caracterizados pelo seu raio e por  $Pt$ . São utilizados para a calibração do sistema de coordenadas do perfil [25].

- **Padrões Tipo E2 - “*Precision prism*” (Prisma de precisão)**

Estes padrões de medição são caracterizados pelos ângulos entre as superfícies e  $Pt$  em cada superfície (Figura 5.24) [25].

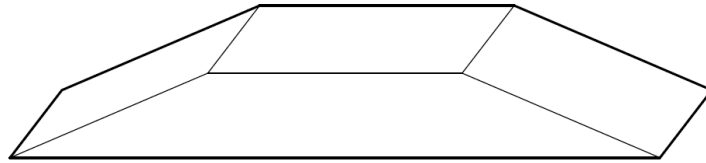


Figura 5.24 - Padrão de Medição Tipo E2 [25].



## 6 Métodos Experimentais

Hoje em dia encontra-se comercialmente disponível uma vasta gama de sistemas de análise de superfícies para utilização em metrologia tridimensional, como sejam as medições da espessura dos traços numa escala (*line width*), do passo em grelhas 1D/2D (*pitch on 1D/2D gratings*), a altura de sulcos (*step height*), da rugosidade, entre outras, de modo a dar resposta às necessidades de medição à escala manométrica e micrométrica. Neste conjunto de sistemas englobam-se os microscópios de varrimento laser (SPM – *Scanning Probe Microscope*), os microscópios de força atómica (AFM – *Atomic Force Microscope*), os interferómetros laser e os perfilómetros de contacto (Rugosímetros) [26].

As irregularidades microgeométricas presentes na superfície de uma peça, resultantes, por exemplo, de um processo de maquinagem, correspondem a rugosidades que geralmente não são as desejadas e, portanto, importa conhecê-las e controlá-las. Para esse efeito existem vários métodos, sendo que um deles consiste na utilização de um equipamento específico designado por rugosímetro [2]. Em metrologia de rugosidade a superfície é digitalizada com um equipamento de medição por contacto (*stylus instrument*) de acordo com o método de perfil descrito na norma ISO 3274:1996 – *Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface Texture: Profile Method – Nominal characteristics of contact (stylus) instruments* [27]. O instrumento de medição que verifica as superfícies com uma ponta de contacto (*stylus tip*) é normalmente designado de rugosímetro

O rugosímetro (Figura 6.1) é um aparelho electrónico utilizado para medir a rugosidade da superfície das peças e permitir a realização do controlo da qualidade do estado da superfície, isto é, verificar se esta está ou não em conformidade com os valores especificados nos desenhos do produto/peça. Trata-se de um instrumento de medição que percorre as superfícies com uma ponta de contacto (*stylus tip*), sendo os movimentos do *stylus* captados por sensores electrónicos que ampliam e convertem os sinais, permitindo a apresentação da rugosidade em gráficos e a obtenção dos valores dos parâmetros de rugosidade definidos pela norma ISO 4287:1997 – *Geometrical Product Specification (GPS) – Surface Texture: Profile Method – Terms, definitions and surface texture parameters*.

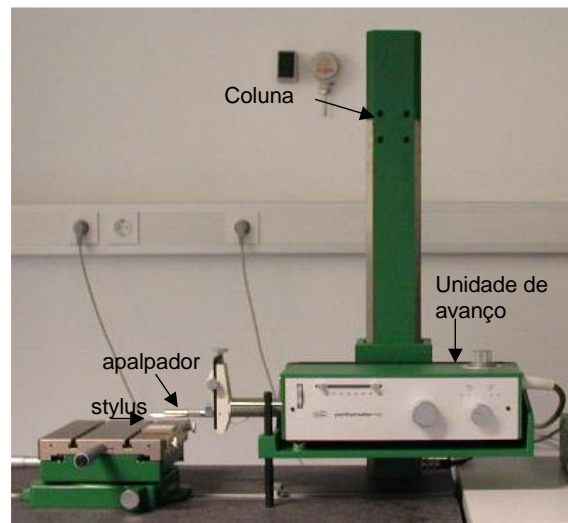


Figura 6.1 – Rugosímetro do IPQ e respectivo sistema de medição.

Fundamentalmente, existem dois tipos de rugosímetros: o equipamento que fornece apenas a leitura dos parâmetros de rugosidade, cuja utilização é mais frequente na produção, e equipamentos que, para além dessa leitura, permitem o registo de dados de acordo com as características ou parâmetros seleccionados e, em alguns equipamentos, fazer a análise estatística de uma série de medições, sendo a sua utilização mais frequente nos Laboratórios de Metrologia.

O princípio de funcionamento destes equipamentos baseia-se na deslocação do apalpador sobre a superfície a avaliar (Figura 6.1), sendo os movimentos do apalpador captados por sensores electrónicos que ampliam e convertem os sinais, permitindo a apresentação da rugosidade em gráficos ou os parâmetros de rugosidade em dígitos. A leitura dos parâmetros pode ser analógica ou digital [2].

## 6.1 Constituição e características de um Rugosímetro

### 6.1.1 Componentes do Rugosímetro

**Instrumento “stylus”** - Elemento de medição que analisa as superfícies com um “stylus”, adquire os desvios de forma do perfil da superfície e calcula os parâmetros em questão, possibilitando o registo do perfil. Trata-se de uma peça que geralmente é de diamante, de modo a permitir uma maior resistência ao desgaste.

**Elementos de controlo** - Cadeia fechada que compreende todos os componentes mecânicos que fazem a ligação entre a peça a ser verificada e a ponta do apalpador, tais como por exemplo, meios

de alinhamento, dispositivo de fixação (mesa de duas coordenadas), anel de medição, unidade de avanço, sonda (sensor).

**Apalpador** - Elemento de ligação entre o *stylus* e a unidade motora. No processo de medição da rugosidade, desliza sobre a superfície a verificar, transmitindo os sinais captados para o amplificador; o apalpador é caracterizado pela geometria do *stylus*, a qual pode ser em cone com a ponta esférica, pela força estática de medição, pelo ângulo do cone e pela amplitude de medição.

A selecção do apalpador deve ser efectuada de acordo com as características do padrão de rugosidade a calibrar ou da superfície a ser medida, isto é, para valores pequenos de rugosidade, utilizam-se apalpadores de classe de sensibilidade I, cujo alcance de medição é de  $\pm 25 \mu\text{m}$ . No caso de se tratar de uma avaliação com valores de rugosidade mais elevados, ou para o caso da superfície a avaliar não ser plana e/ou conter irregularidades visíveis a um simples olhar, então devem ser utilizados apalpadores de classe de sensibilidade tipo II, cujo alcance de medição é de  $\pm 250 \mu\text{m}$ ;

**Unidade motora** - Permite o deslocamento do apalpador sobre a superfície a verificar, transmitindo os sinais captados para o amplificador;

**Amplificador** - É a unidade electrónica principal onde os sinais depois de recebidos do apalpador são amplificados, tratados e transmitidos para um visor;

**Mesa de duas coordenadas** - Serve para fixar e alinhar as peças de trabalho, permitindo um ajuste segundo coordenadas;

**Transdutor** - Dispositivo que converte as coordenadas verticais do perfil traçado referido ao perfil de referência, na forma de sinal utilizada no instrumento;

Na Figura 6.2 são ilustrados os componentes de um rugosímetro.

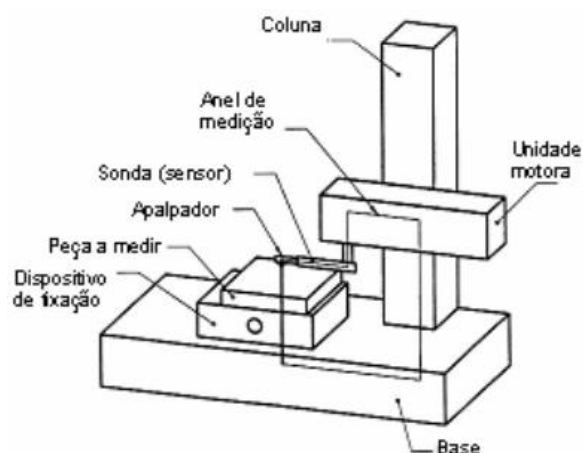


Figura 6.2 – Elementos constituintes do rugosímetro [27].

## 6.2 Calibração de Padrões de Rugosidade Tipo C e D

Os itens que irão ser calibrados durante a presente dissertação são os padrões de rugosidade tipo C e D, por serem os mais utilizados nas unidades fabris [25], utilizando o Rugosímetro da marca Mahr, modelo S8P. Os apalpadores são selecionados consoante as características do padrão de rugosidade a avaliar.

Como padrão de referência, para a calibração do rugosímetro de referência (IPQ), utilizou-se o padrão de rugosidade de tipo A1, da marca Mahr, Modelo PEN-10-1 (Figura 6.3).

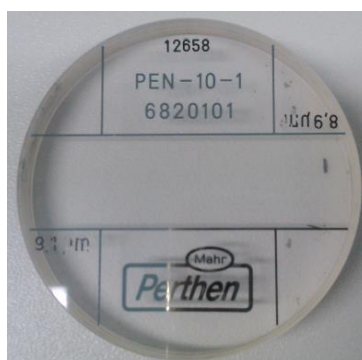


Figura 6.3 – Padrão de rugosidade de referência de tipo A1, modelo PEN-10-1, da marca Mahr.

### 6.2.1 Condições de referência

A temperatura de referência aquando deste tipo de calibrações é de 20 °C, sendo que a realização deste tipo de calibrações só deve ser efectuada caso a temperatura ambiente do laboratório for de  $(20 \pm 1 \text{ °C})$  e a variação de temperatura, for  $< 0,5 \text{ °C}$  durante, no mínimo 1 hora [23].

No certificado de calibração são apresentados os valores de temperatura registados durante os ensaios, sob a designação de “Condições Ambientais”.

O padrão de rugosidade a calibrar, o padrão de rugosidade Tipo A1 de referência (Figura 6.3) e o apalpador selecionado, deverão estabilizar a temperatura antes da realização dos ensaios, sendo recomendado que permaneçam pelo período mínimo de 1 hora no laboratório [23].

### 6.2.2 Modo operativo

#### 6.2.2.1 Medição dos parâmetros do perfil

Sempre que o comprimento amostral seja indicado na documentação técnica do padrão de rugosidade, ou no desenho técnico, o comprimento de onda de corte,  $\lambda_c$ , deve ser seleccionado de modo a ser igual a esse comprimento amostral. No caso de não existir nenhuma informação que o especifique, então o mesmo deve ser determinado de acordo com o descrito de seguida:



Quando a direcção de medição não é especificada, o padrão de rugosidade deve ser posicionado de tal forma que a direcção da secção corresponda aos valores máximos de altura dos parâmetros de rugosidade (ex.:  $Ra$ ,  $Rz$ , etc...).

As medições devem ser realizadas na parte da superfície sobre a qual são esperados valores críticos (pode ser analisado através de inspecção visual). Quanto às medições individuais, estas devem ser distribuídas de modo equitativo sobre a superfície, de modo a obter resultados de medição independentes.

Para determinar os valores dos parâmetros de rugosidade do perfil, é necessário em primeiro lugar analisar se o perfil de rugosidade é ou não periódico. Com base nesta determinação, deve ser seguido um dos seguintes procedimentos a ser indicado de seguida, salvo indicação contrária. Se forem utilizados procedimentos especiais, os mesmos devem vir indicados no protocolo de medição.

#### **6.2.2.2 Procedimento para perfis de rugosidade não periódicos**

Para superfícies com um perfil de rugosidade não periódico, deve ser seguido o seguinte procedimento:

- a) Estimar o parâmetro do perfil de rugosidade desconhecido,  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $RzI_{max}$  ou  $RSm$ , através de inspecção visual, por comparação de rugosidade com superfícies de referência, por análise gráfica do perfil total traçado, etc.
- b) Estimar o comprimento amostral através das Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3, utilizando os parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $RzI_{max}$  ou  $RSm$  estimados em a).
- c) Com o instrumento de medição, obter uma medição representativa dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $RzI_{max}$  ou  $RSm$ , utilizando o comprimento amostral estimado em b).
- d) Comparar os resultados estimados dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $RzI_{max}$  ou  $RSm$ , com a gama de valores de  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $RzI_{max}$  ou  $RSm$  medidos, correspondendo ao comprimento amostral estimado. Caso o valor medido esteja fora da gama de valores para o comprimento amostral estimado, ajustar o equipamento para o comprimento amostral inferior ou superior ao anteriormente definido. De seguida, medir o novo comprimento amostral e comparar novamente os valores obtidos com os valores tabelados.
- e) Obter uma medição representativa dos parâmetros desejados, utilizando o valor de comprimento de onda de corte (comprimento amostral) estimado nos passos precedentes.

### 6.2.2.3 Procedimento para perfis de rugosidade periódicos

Para superfícies com um perfil de rugosidade periódico, deve ser seguido o seguinte procedimento:

- Estimar graficamente o parâmetro  $RSm$  da superfície com rugosidade desconhecida.
- Determinar o valor de comprimento amostral recomendado para o parâmetro estimado  $RSm$ , utilizando a Tabela 6.3.
- Se necessário, em caso de dúvida, medir o valor do parâmetro  $RSm$ , utilizando o valor de comprimento amostral determinado em b).
- Se o valor do parâmetro  $RSm$  determinado em c) se refere, de acordo com a Tabela 6.3, a um valor maior ou menor de comprimento amostral calculado em b), usar o valor de comprimento amostral maior ou menor, respectivamente.
- Obter uma medição representativa dos parâmetros desejados, utilizando o valor de comprimento de onda de corte (comprimento amostral) estimado nos passos precedentes.

Tabela 6.1 – Comprimentos amostrais de rugosidade para a medição de  $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rsk$ ,  $Rku$ ,  $RAq$  e curvas e parâmetros relacionados para perfis não periódicos [21].

$Ra$ ( $\mu m$ )	Comprimento amostral de rugosidade, $l_r$ (mm)	Comprimento de avaliação de rugosidade, $l_n$ (mm)
$(0,006) < Ra \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < Ra \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < Ra \leq 2$	0,8	4
$2 < Ra \leq 10$	2,5	12,5
$10 < Ra \leq 80$	8	40

Tabela 6.2 - Comprimentos amostrais de rugosidade para a medição de  $R_z$ ,  $R_v$ ,  $R_p$ ,  $R_c$  e  $R_t$  e curvas e parâmetros relacionados para perfis não periódicos [21].

$R_z^{1)}$ $R_{z1max.}^{2)} (\mu m)$	Comprimento amostral de rugosidade, $l_r$ (mm)	Comprimento de avaliação de rugosidade, $l_n$ (mm)
$(0,025) < R_z, R_{z1max.} \leq 0,1$	0,08	0,4
$0,1 < R_z, R_{z1max.} \leq 0,5$	0,25	1,25
$0,5 < R_z, R_{z1max.} \leq 10$	0,8	4
$10 < R_z, R_{z1max.} \leq 50$	2,5	12,5
$50 < R_z, R_{z1max.} \leq 200$	8	40
<p>1) <math>R_z</math> é usado quando se mede <math>R_z</math>, <math>R_v</math>, <math>R_p</math>, <math>R_c</math>, e <math>R_t</math></p> <p>2) <math>R_{z1max.}</math> é usado somente quando se mede <math>R_{z1max.}</math>, <math>R_{v1max.}</math>, <math>R_{p1max.}</math> e <math>R_{c1max.}</math></p>		

Tabela 6.3 - Comprimentos amostrais de rugosidade para a medição de parâmetros de rugosidade de perfis periódicos, e  $RSm$  de perfis periódicos e não periódicos [21].

$RSm (\mu m)$	Comprimento amostral de rugosidade, $l_r$ (mm)	Comprimento de avaliação de rugosidade, $l_n$ (mm)
$0,0013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

### 6.2.3 Descrição do modo operativo

O estado de superfície do padrão deve ser analisado visualmente, procedendo-se ao registo dos defeitos de superfície. Sempre que justificável, a superfície do padrão deve ser fotografada, recorrendo-se para tal à utilização do estereomicroscópio e máquina fotográfica digital. Utilizar as folhas de registo de defeito, quando aplicável [23].

O apalpador deve ser seleccionado de acordo com as características do padrão de rugosidade a calibrar (classe de sensibilidade I ou II, como referido anteriormente).

Coloca-se o apalpador seleccionado na unidade motora, sendo este posteriormente calibrado de acordo com o Procedimento Técnico de Calibração de Apalpadores [28].

O padrão de rugosidade de tipo A é medido, de modo a avaliar uma das componentes de incerteza associada ao processo de medição, a ter em conta aquando do cálculo do balanço de incertezas. Para tal são avaliados os parâmetros  $Pt$  ou  $d$ , efectuando 5 medições, uma para cada linha ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ), conforme esquematizado na Figura 6.4, e de acordo com a norma de referência ISO 5436-1.

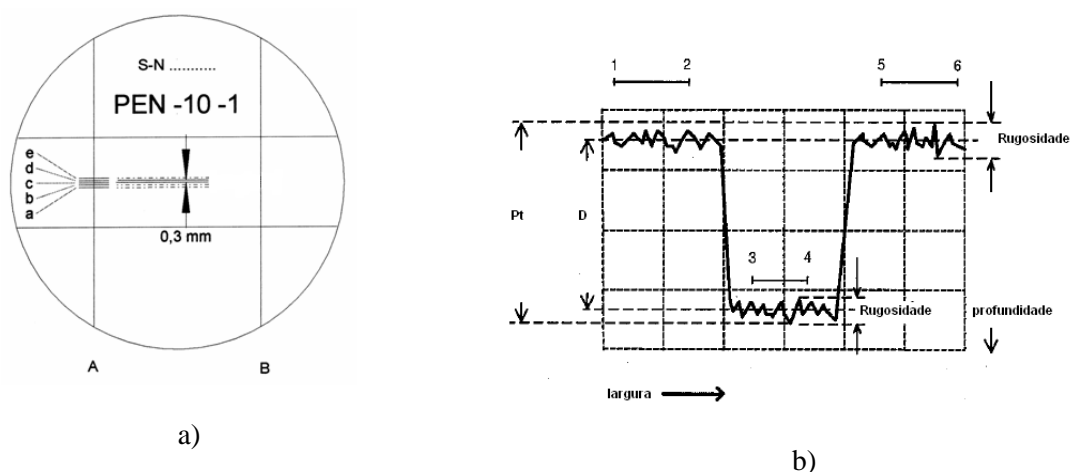


Figura 6.4 – Linhas de traçagem sobre o padrão de rugosidade Tipo A (a) e Sulco (b)) [23].

É determinado o Factor de Correção ( $C1$ ), devido à calibração do apalpador. Este factor é devido à realização da calibração do apalpador, devendo ser multiplicado a cada parâmetro de rugosidade avaliado, conforme descrito no procedimento técnico [23]. É obtido pela Equação 6.1:

$$C1 = \frac{Dn}{dm} \text{ ou } C1 = \frac{Ptn}{Ptm} \quad \text{Equação 6.1}$$

Onde:

- $dm$  e  $Ptm$ , resultantes da média dos 5 valores ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ), provenientes do Certificado de Calibração do Padrão de Rugosidade Tipo A;
- $Dn$  e  $Ptn$ , resultantes da média dos 5 valores ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ), obtidos na medição do Padrão de Rugosidade Tipo A.

Retira-se o Padrão de Rugosidade Tipo A da mesa de trabalho e coloca-se o Padrão de Rugosidade a calibrar na mesa de trabalho, alinhando-o com o apalpador.

São então definidas as condições de medição de acordo com o procedimento técnico [23].

#### **6.2.4 Calibração de rugosímetros**

Num rugosímetro, a informação sobre a superfície é detectada pelo apalpador e pode sofrer distorções não controladas, devido por exemplo à forma do *stylus* ou ao facto de nem sempre a superfície em análise ter as mesmas especificações metrológicas que os parâmetros calibrados do rugosímetro.

Os parâmetros de rugosidade em análise podem variar de superfície para superfície, pelo que a calibração de rugosímetros deve ser efectuada periodicamente e antes da medição da superfície em questão, através da utilização de padrões de rugosidade calibrados para os parâmetros a controlar [18].

Apenas assim se consegue obter compatibilidade entre os valores dos parâmetros de rugosidade de um padrão calibrado e os valores reais da superfície mecânica a controlar.



## 7 Curvas de tendência em medições de rugosidade superficial

Neste capítulo pretende-se a realização de medições de padrões de rugosidade, de modo a identificar tendências dos resultados de medição de parâmetros de rugosidade pré-definidos ( $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ ) em função das condições de medição (ex.: comprimento total de medição, ângulo entre a direcção do movimento do *stylus* e a superfície sob avaliação – inclinação –, tipo de apalpador). Pretende-se também efectuar o estudo sobre a quantificação da influência que um valor de inclinação diferente do definido como critério de aceitação, no procedimento técnico de calibração de apalpadores [28] ( $\pm 0,10 \mu\text{m}/\text{mm}$ ), tem no valor do parâmetro de rugosidade em avaliação.

### 7.1 Método para aquisição dos dados (Processo de medição)

Utilizou-se para o efeito o rugosímetro “Perthometer Concept V7.21”, da marca Mahr, para a medição dos parâmetros de rugosidades tendo como base o método de medição descrito no procedimento técnico [23], implementado no laboratório de comprimento do IPQ. Foram realizadas as seguintes sequências de operações de medição sobre o Padrão de Rugosidade tipo D do laboratório:

- 1) Com o apalpador cujas características são: raio do apalpador ( $r_{tip}$ ) =  $5 \mu\text{m}$ , amplitude de medição de  $\pm 25 \mu\text{m}$ , foram obtidos os valores dos parâmetros de rugosidade  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$  para um comprimento total de medição  $lt = 17,5 \text{ mm}$  e  $lt = 5,6 \text{ mm}$ , em função da variação da inclinação. De acordo com o descrito em 6.2.3 (Descrição do modo operativo), procedeu-se ao cálculo do factor de correcção (C1), associado à calibração do apalpador em questão, sendo este valor posteriormente multiplicado a cada parâmetro de rugosidade avaliado:

Tabela 7.1 –Reprodutibilidade para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ .

Linha de traçagem	$d (\mu\text{m})$
A	8,926
B	8,950
C	8,971
D	8,957
E	8,936

Média ( $dm$ )	8,948
Desvio-Padrão	0,018

Do Certificado de Calibração do padrão de referência Tipo A1, vem  $Dn = 9,030 \mu\text{m}$ , donde se obtém o seguinte factor de correcção (C1):

$$C1 = \frac{Dn}{dm} = \frac{9,030 \mu\text{m}}{8,948 \mu\text{m}} = 1,009 \quad \text{Equação 7.1}$$

- Para  $lt = 17,5 \text{ mm}$ , obtiveram-se os seguintes valores (Tabela 7.2):

Tabela 7.2 – Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ ,  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$s$ ( $Ra$ ) ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$s$ ( $Rz$ ) ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )	$s$ ( $Rt$ ) ( $\mu\text{m}$ )
-1,010	3,063	0,013	9,805	0,063	9,915	0,155
-0,760	3,071	0,010	9,813	0,058	9,914	0,159
-0,497	3,066	0,010	9,807	0,051	9,914	0,156
-0,257	3,063	0,007	9,805	0,054	9,912	0,171
-0,003	3,060	0,007	9,792	0,038	9,913	0,162
0,257	3,055	0,003	9,769	0,054	9,877	0,179
0,507	3,051	0,003	9,764	0,043	9,867	0,166
0,763	3,052	0,005	9,777	0,044	9,901	0,169
1,003	3,056	0,006	9,796	0,056	9,919	0,163

Nota:  $s$  designa desvio-padrão. De modo a garantir a repetibilidade dos resultados obtidos, foram efectuadas 3 medições, sobre o padrão de rugosidade, na mesma linha de traçagem, sendo os resultados de inclinação e dos parâmetros de rugosidade apresentados nas tabelas 7.2, 7.3, 7.5, 7.6, 7.11 a 7.14 e 7.16 a 7.19, os correspondentes à média dos resultados dessas 3 medições. Para o presente estudo, consideraram-se valores de inclinação até  $\pm 1 \mu\text{m}/\text{mm}$ , pois o objetivo principal é o de determinar o quanto o erro de inclinação (corresponde a um mau alinhamento) introduz no erro de medição do parâmetro de rugosidade em avaliação. Note-se que actualmente o critério de aceitação de uma medição é de que o valor de inclinação se situe entre  $\pm 0,1 \mu\text{m}/\text{mm}$  [28].

Durante o processo de medição verificou-se que a partir de valores de inclinação superiores a  $\pm 1 \mu\text{m}/\text{mm}$  não era possível efectuar medições sobre o padrão de rugosidade, uma vez que deixava de existir contacto entre o *stylus* e a superfície a avaliar. Do exposto não é portanto relevante estudos para valores de inclinação fora do intervalo utilizado.

Graficamente:



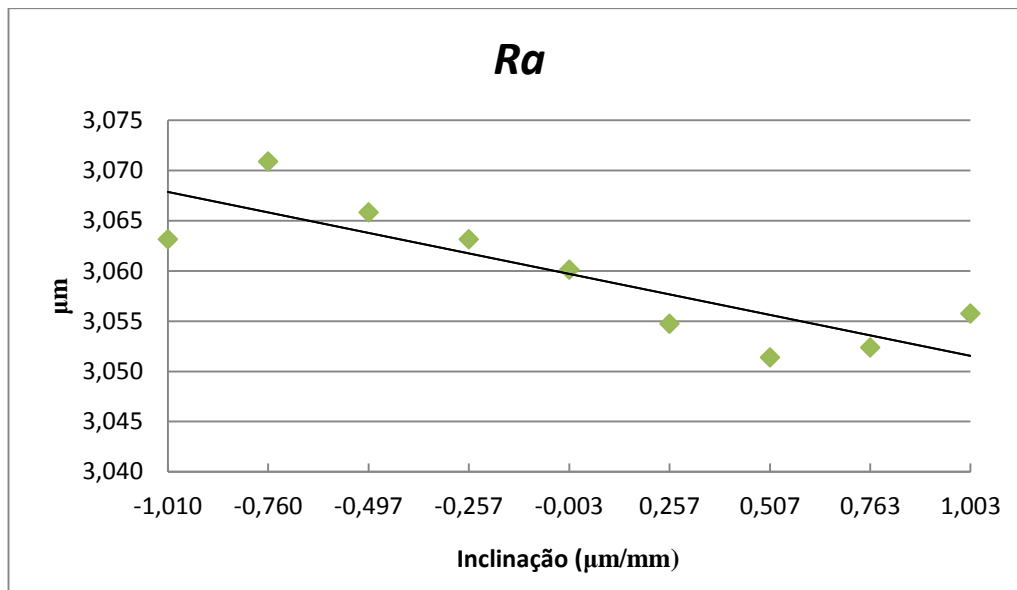


Figura 7.1 - Curva de tendência do parâmetro  $Ra$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ ,  $l_t = 17,5 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Ra$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 2,013 \mu\text{m}/\text{mm}$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Ra = 0,013 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,007 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Ra$ .

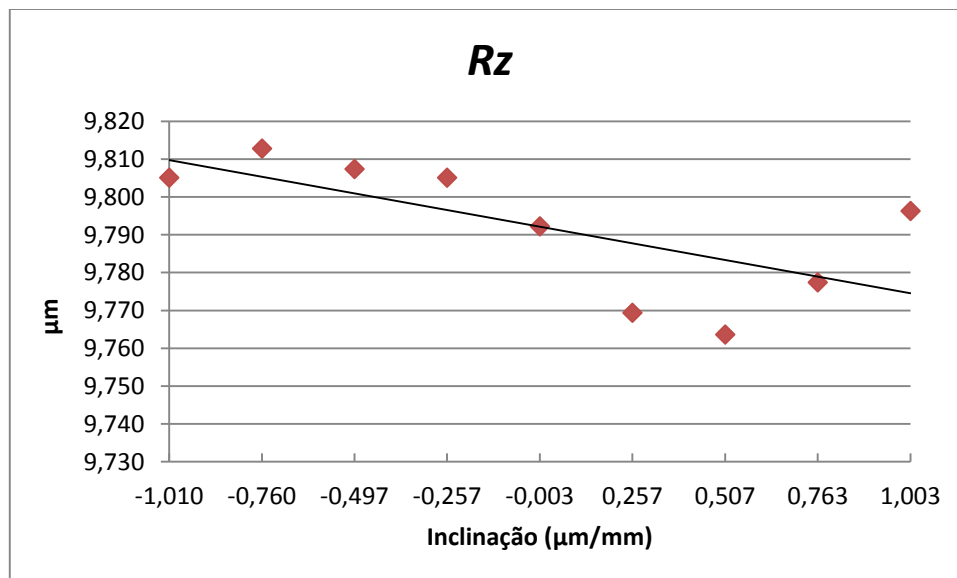


Figura 7.2 - Curva de tendência do parâmetro  $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ ,  $l_t = 17,5 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Rz$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 2,013 \mu\text{m}/\text{mm}$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Rz = 0,038 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,019 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Rz$ .

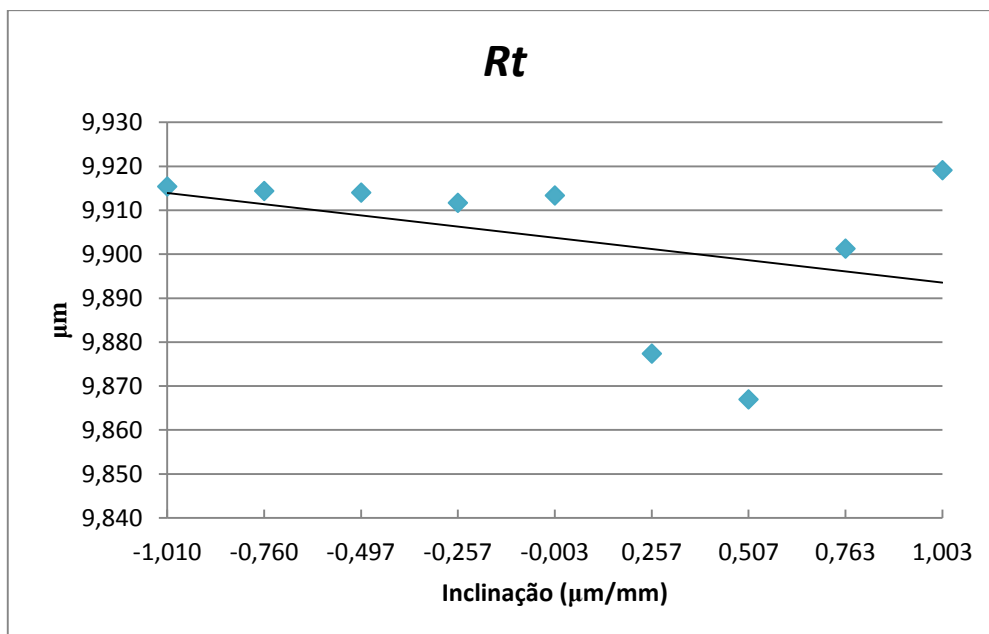


Figura 7.3 - Curva de tendência do parâmetro  $R_z$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ ,  $l_t = 17,5 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $R_t$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 2,013 \mu\text{m/mm}$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta R_t = 0,038 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,019 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $R_t$ .

- Para  $l_t = 5,6 \text{ mm}$ , os resultados obtidos foram:

Tabela 7.3 - Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ ,  $l_t = 5,6 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$s(R_a)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$s(R_z)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_t$ ( $\mu\text{m}$ )	$s(R_t)$ ( $\mu\text{m}$ )
-0,993	3,078	0,001	9,993	0,043	10,125	0,143
-0,747	3,079	0,002	9,998	0,052	10,137	0,153
-0,493	3,079	0,001	9,989	0,055	10,122	0,158
-0,250	3,076	0,003	9,977	0,040	10,094	0,122
0,010	3,076	0,005	9,987	0,053	10,125	0,145
0,250	3,076	0,005	9,985	0,038	10,119	0,105
0,493	3,074	0,005	9,978	0,060	10,118	0,178
0,743	3,073	0,004	9,986	0,038	10,130	0,105
0,997	3,076	0,009	9,990	0,042	10,117	0,120

Graficamente:

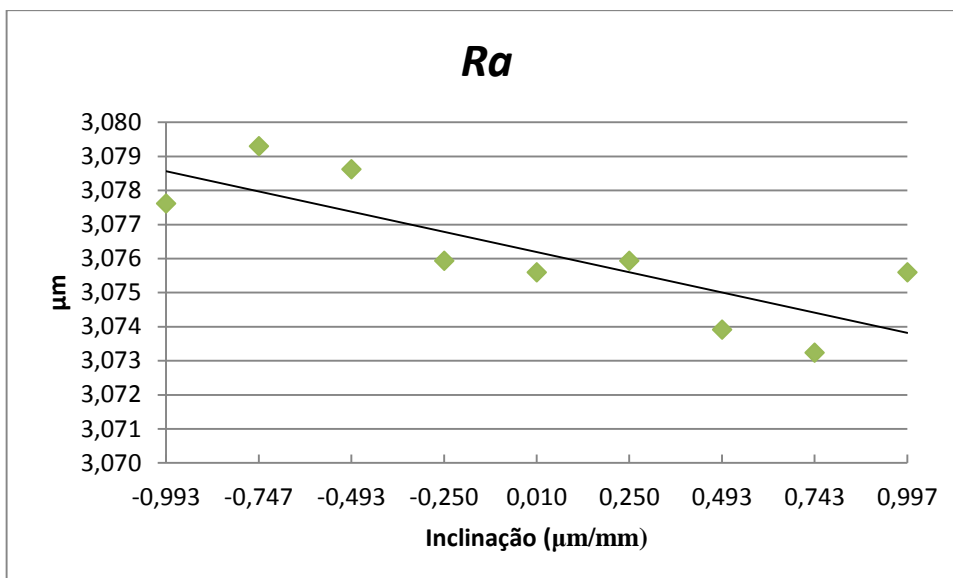


Figura 7.4 - Curva de tendência do parâmetro  $Ra$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu m$ ,  $lt = 5,6 mm$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Ra$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,990 \mu m/mm$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Ra = 0,005 \mu m$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,003 \mu m$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Ra$ .

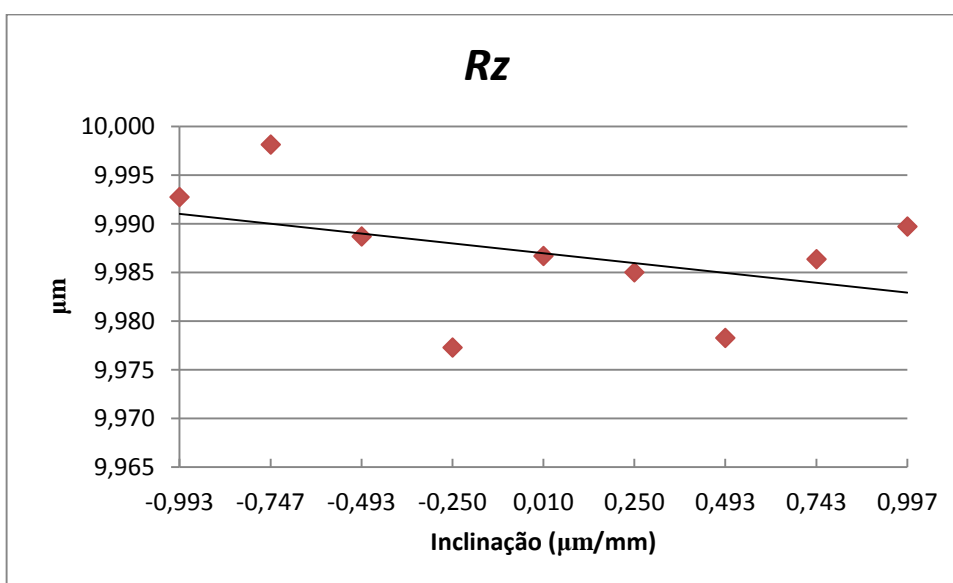


Figura 7.5 - Curva de tendência do parâmetro  $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu m$ ,  $lt = 5,6 mm$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Rz$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,990 \mu m/mm$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Rz = 0,014 \mu m$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,007 \mu m$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Rz$ .

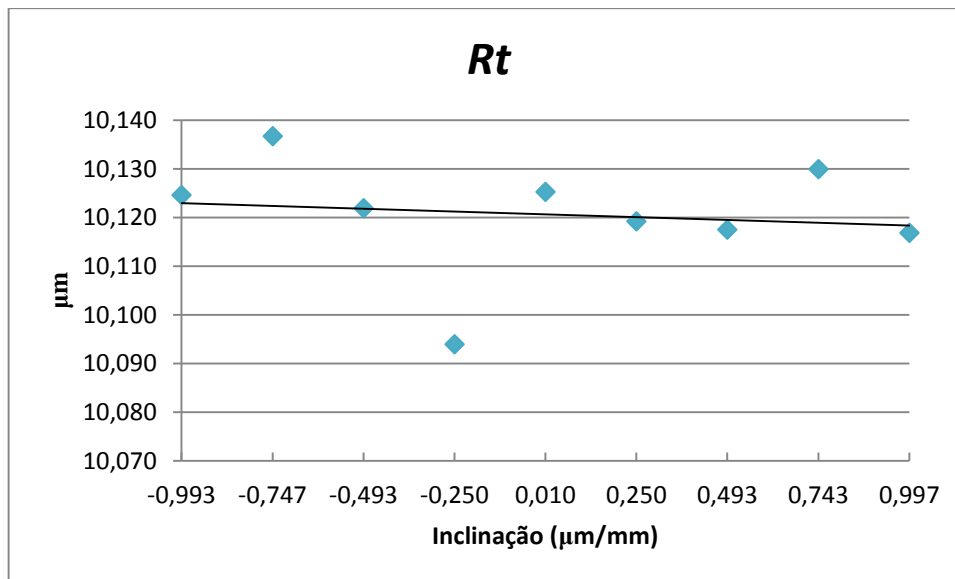


Figura 7.6 - Curva de tendência do parâmetro  $Rt$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ ,  $lt = 5,6 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Rt$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,990 \mu\text{m/mm}$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Rt = 0,013 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,007 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Rt$ .

- 2) Com o apalpador cujas características são  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ , amplitude de medição de  $\pm 25 \mu\text{m}$ , foram obtidos os valores dos parâmetros de rugosidade  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$  para um comprimento total de medição  $lt = 17,5 \text{ mm}$  e  $lt = 5,6 \text{ mm}$ , em função da variação da inclinação. Novamente, de acordo com o descrito em 6.2.3 (Descrição do modo operativo), procedeu-se ao cálculo do factor de correcção (C1), associado à calibração do apalpador em questão, sendo este valor posteriormente multiplicado a cada parâmetro de rugosidade avaliado:

Tabela 7.4 – Reprodutibilidade para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ .

Linha de traçagem	$d (\mu\text{m})$
$a$	9,033
$b$	9,003
$c$	8,984
$d$	9,041
$e$	8,990

Média ( $dm$ )	9,010
Desvio-Padrão	0,026

Do Certificado de Calibração do padrão de referência Tipo A1, vem  $Dn = 9,030 \mu\text{m}$ , donde se obtém o seguinte factor de correcção (C1) (Equação 7.2):

$$C1 = \frac{Dn}{dm} = \frac{9,030 \mu\text{m}}{9,010 \mu\text{m}} = 1,002 \quad \text{Equação 7.2}$$

- Para  $lt = 17,5 \text{ mm}$ , os resultados obtidos foram:

Tabela 7.5 - Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ ,  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$Ra (\mu\text{m})$	$s(Ra) (\mu\text{m})$	$Rz (\mu\text{m})$	$s(Rz) (\mu\text{m})$	$Rt (\mu\text{m})$	$s(Rt) (\mu\text{m})$
-1,017	2,173	0,383	7,247	0,898	10,015	0,264
-0,757	3,064	0,001	9,835	0,051	10,003	0,243
-0,490	3,059	0,002	9,863	0,078	10,056	0,183
-0,257	3,055	0,004	9,809	0,069	9,981	0,250
-0,007	3,055	0,001	9,796	0,043	9,953	0,212
0,240	3,048	0,002	9,774	0,050	9,955	0,239
0,503	3,043	0,002	9,767	0,030	9,972	0,218
0,747	3,040	0,002	9,765	0,038	9,967	0,222
0,997	3,039	0,002	9,766	0,037	9,971	0,215

Graficamente:

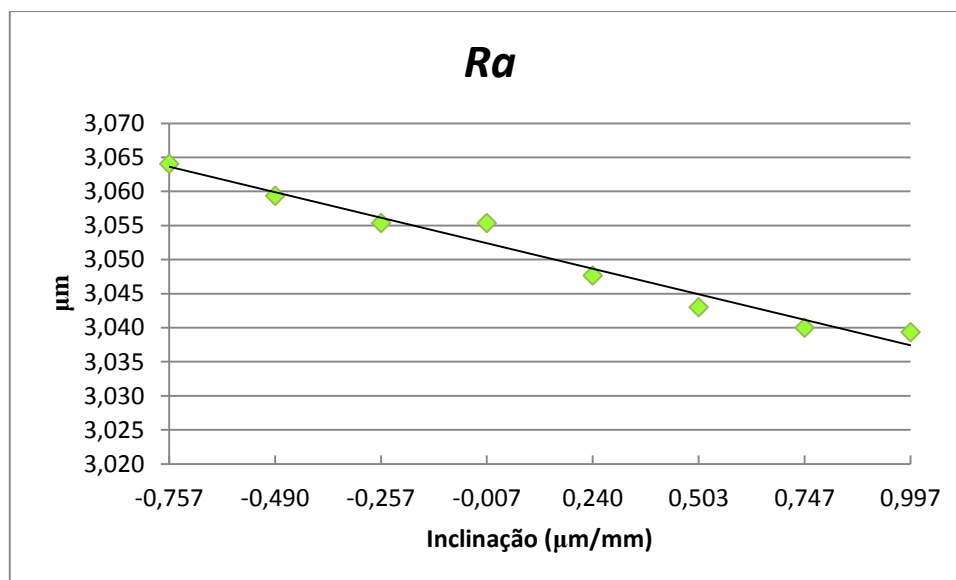


Figura 7.7 - Curva de tendência do parâmetro  $Ra$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ ,  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Ra$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,754 \mu\text{m}/\text{mm}$  a variação do

parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Ra = 0,020 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,010 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Ra$ .

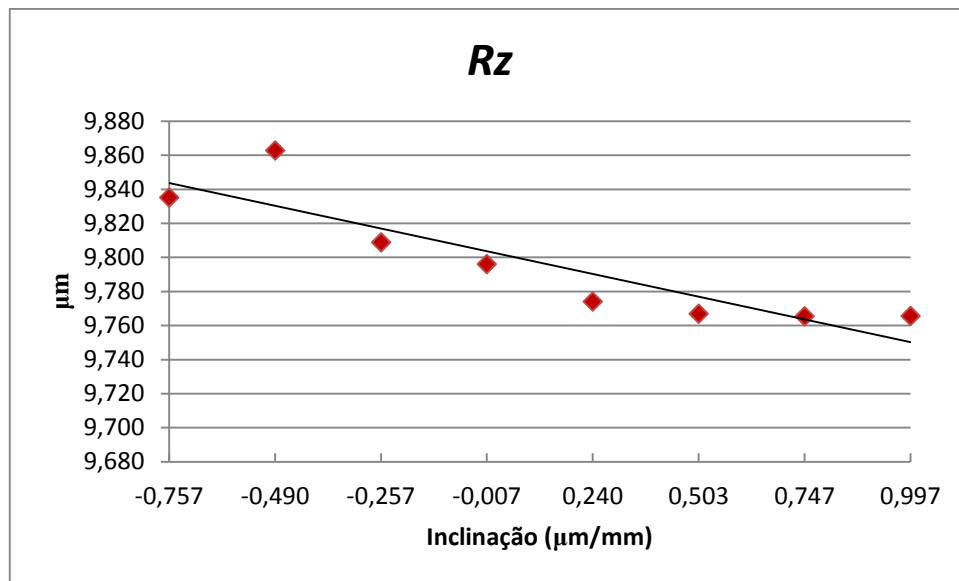


Figura 7.8 - Curva de tendência do parâmetro  $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ ,  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Rz$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,754 \mu\text{m/mm}$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Rz = 0,070 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,035 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Rz$ .

Nota: Para as figuras 7.7 e 7.8, não foram considerados os valores obtidos para a inclinação de  $-1 \mu\text{m/mm}$ , uma vez que estes se apresentam bastante desenquadrados dos restantes valores para este apalpador e comprimento total de medição, como se pode constatar pela Tabela 7.5.

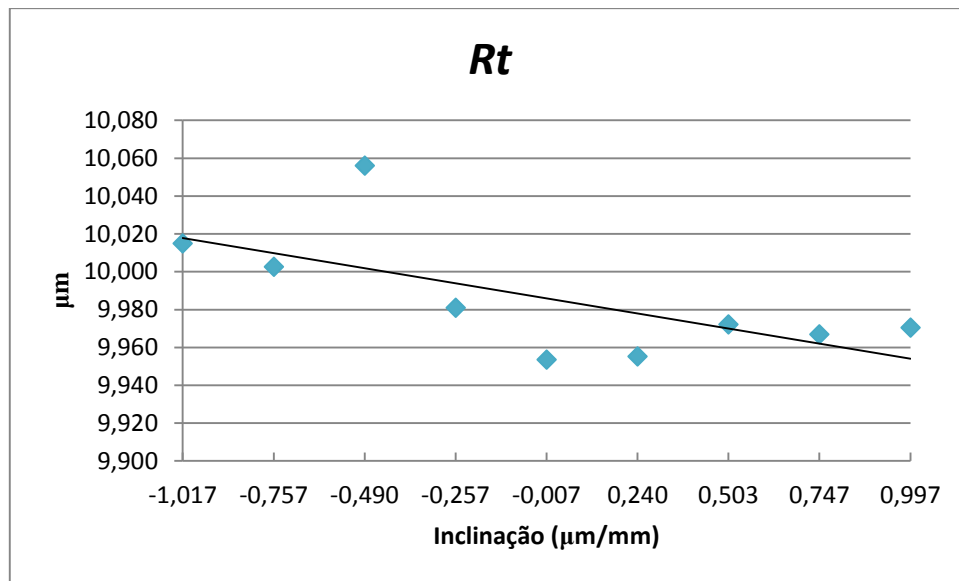


Figura 7.9 - Curva de tendência do parâmetro  $Rt$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ ,  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Rt$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 2,013 \mu\text{m/mm}$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Rt = 0,060 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,030 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Rt$ .

- Para  $lt = 5,6 \text{ mm}$ , os resultados obtidos foram:

Tabela 7.6 - Quadro-resumo dos valores obtidos para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ ,  $lt = 5,6 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$s(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$s(Rz)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )	$s(Rt)$ ( $\mu\text{m}$ )
-0,987	3,059	0,003	10,055	0,024	10,266	0,156
-0,753	3,057	0,001	10,053	0,026	10,253	0,140
-0,490	3,058	0,001	10,064	0,054	10,323	0,218
-0,240	3,059	0,002	10,084	0,039	10,367	0,163
0,000	3,059	0,003	10,088	0,031	10,379	0,224
0,250	3,058	0,004	10,049	0,038	10,241	0,166
0,513	3,060	0,004	10,064	0,041	10,275	0,154
0,747	3,059	0,002	10,048	0,025	10,218	0,179
0,987	3,060	0,008	10,041	0,010	10,156	0,128

Graficamente:

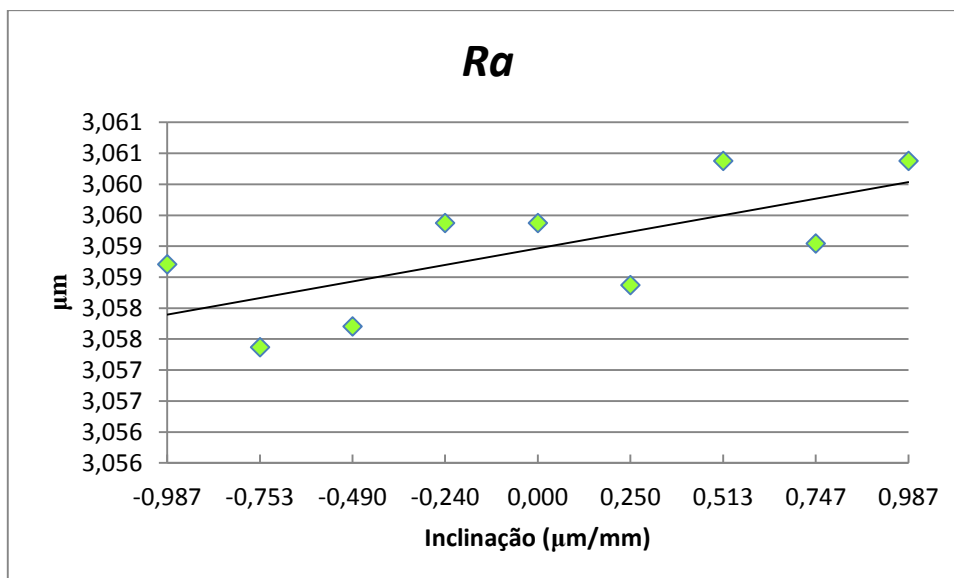


Figura 7.10 - Curva de tendência do parâmetro  $Ra$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu m$ ,  $lt = 5,6 mm$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Ra$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,973 \mu m/mm$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Ra = 0,003 \mu m$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,002 \mu m$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Ra$ .

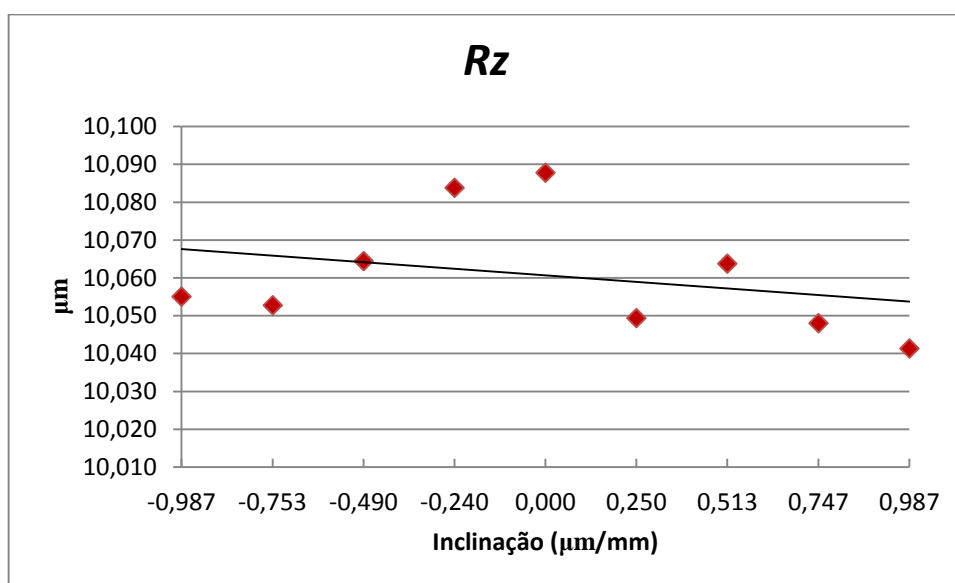


Figura 7.11 - Curva de tendência do parâmetro  $Rz$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu m$ ,  $lt = 5,6 mm$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $Rz$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,973 \mu m/mm$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta Rz = 0,036 \mu m$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,018 \mu m$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $Rz$ .



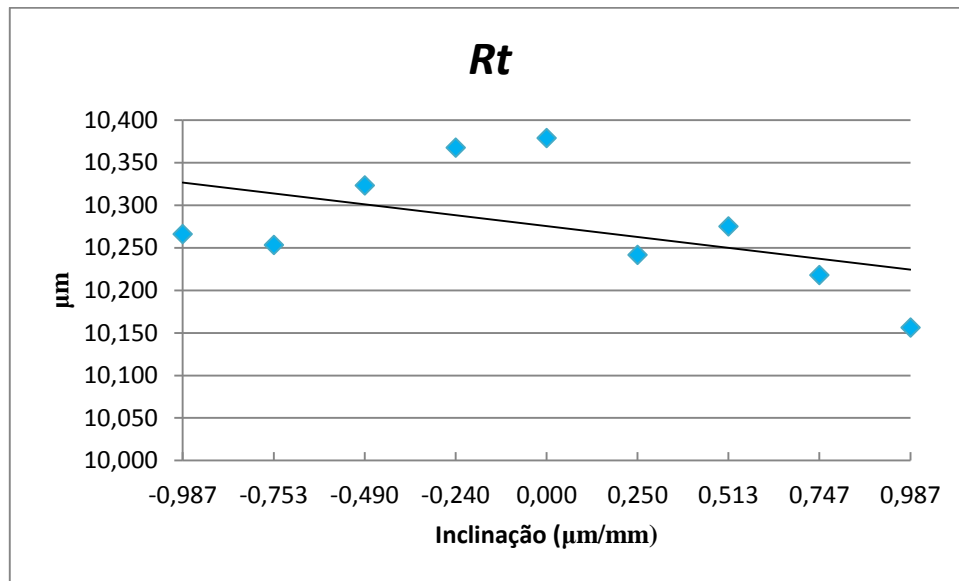


Figura 7.12 - Curva de tendência do parâmetro  $R_t$ , utilizando o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$ ,  $l_t = 5,6 \text{ mm}$ .

Do tratamento de dados (desprezando os valores máximos e mínimos para o parâmetro  $R_t$ ), verificou-se ainda que para uma variação máxima de inclinação de  $\Delta I = 1,973 \mu\text{m/mm}$  a variação do parâmetro de rugosidade foi:  $\Delta R_t = 0,150 \mu\text{m}$ , ou seja introduz-se um erro de  $\pm 0,075 \mu\text{m}$ , no valor do parâmetro de rugosidade em medição, neste caso em  $R_t$ .

Nota: A linha de tendência apresentada em cada gráfico corresponde a uma linha de tendência linear.

Conclusões:

Verifica-se, com exceção da figura 7.10, que os valores obtidos para os parâmetros de rugosidade em estudo, têm tendência a diminuir de valor à medida que se aumenta a inclinação.

Quanto menor é o comprimento total de medição, mais elevados são os valores dos parâmetros de rugosidade.

Verifica-se a existência de um erro associado à medição de cada parâmetro, devido à variação da inclinação com que o mesmo é medido. Deste modo, conclui-se que esta fonte de incerteza deverá ser contabilizada no Balanço de Incerteza.

## 7.2 Balanço de incerteza dos valores de medição

De acordo com o sistema e método de medição implementado no laboratório, são considerados como fontes de incerteza as seguintes:

- **Padrão de referência (Padrão Tipo A),  $u_1(y)$**

O parâmetro de rugosidade tipo  $Rx$ , em avaliação é determinado através da média de 5 medições efectuadas em diferentes localizações do padrão de rugosidade a ser calibrado (Figura 6.4 a)). A Incerteza de Medição ( $U_n$ ) referente aos parâmetros  $P_{tn}$  e  $d_n$  do padrão de referência são dados no Certificado de Calibração do padrão de referência, sendo o factor de expansão  $k = 2$ . Assim, o seu cálculo é obtido através da Equação 7.3:

$$u_1(y) = u(d_n) = \sqrt{\frac{U_n^2}{k^2}} \quad \text{Equação 7.3}$$

Exemplo:

Do certificado de calibração vem  $U_n = 0,05 \mu\text{m}$ , logo (considerando  $k = 2$ ):

$$u_1(y) = u(d_n) = \sqrt{\frac{U_n^2}{4}} = \sqrt{\frac{0,05^2}{4}} = 2,5 \times 10^{-2} \mu\text{m} \quad \text{Equação 7.4}$$

- **Repetibilidade,  $u_2(y)$**

A incerteza da transferência do valor do padrão de rugosidade tipo A para o apalpador é avaliada através da repetibilidade, que consta de 5 medições sobre o padrão de referência, na mesma linha de traçagem (linha média “c” - Figura 6.4 a)), sendo portanto a avaliação deste componente do tipo A. O seu cálculo é dado pela Equação 7.5:

$$u_2(y) = u(dm_{\text{repet}}) = \sqrt{s^2(dm_{\text{repet}})} \quad \text{Equação 7.5}$$

Exemplo:

Tabela 7.7 - Repetibilidade. Exemplo para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ .

Linha de traçagem	$d (\mu\text{m})$		
c	8,970	Média ( $dm$ )	8,963 $\mu\text{m}$
c	8,958	Desvio-Padrão ( $s$ )	0,008 $\mu\text{m}$
c	8,961		
c	8,953		
c	8,972		

$$u_2(y) = u(dm_{\text{repet}}) = \sqrt{s^2(dm_{\text{repet}})} = \sqrt{0,008^2} = 8 \times 10^{-3} \mu\text{m} \quad \text{Equação 7.6}$$

- **Factor de Calibração (C),  $u_3(y)$**

O valor do parâmetro de rugosidade determinado é dependente da calibração previamente realizada ao apalpador usado. A contribuição do factor de calibração no cálculo da incerteza de medição é determinada através da Equação 7.7, sendo  $dm$  resultante da média de 5 medições efectuadas no padrão de referência, nas posições  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  e  $e$  (Figura 6.4 a)), e  $u(dm)$  o desvio-padrão correspondente:

$$u_3(y) = u(C) = \sqrt{\frac{1}{dm^2} \times [u^2(dm) + u^2(dn)]} \quad \text{Equação 7.7}$$

Com  $u^2(dm) = s^2(dm)$  Equação 7.8

Exemplo:

Tabela 7.8 - Reprodutibilidade. Exemplo para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ .

Linha de traçagem	$d (\mu\text{m})$		
$a$	8,926		
$b$	8,950		
$c$	8,971	Média ( $dm$ )	8,948 $\mu\text{m}$
$d$	8,957	Desvio-Padrão ( $s$ )	0,018 $\mu\text{m}$
$e$	8,936		

$$u^2(dm) = s^2(dm) = 0,018^2 = 3,24 \times 10^{-4} \mu\text{m} \quad \text{Equação 7.9}$$

$$\begin{aligned}
 u_3(y) = u(C) &= \sqrt{\frac{1}{dm^2} \times [u^2(dm) + u^2(dn)]} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{8,948^2} \times [3,24 \times 10^{-4} + (2,5 \times 10^{-2})^2]} \\
 &= 3,44 \times 10^{-3} \mu\text{m}
 \end{aligned} \quad \text{Equação 7.10}$$

- **Ruído do sistema (Rugosímetro),  $u_4(y)$**

Na prática, são efectuadas 12 medições no padrão de referência, na zona de patamar entre sulcos (entre a zona A e B da Figura 6.4 b)), zona do padrão de referência equivalente a um plano óptico), donde se conclui que a avaliação deste componente é do tipo A, uma vez que se trata de várias observações independentes, efectuadas para a grandeza ruído, nas mesmas condições de medição. Esta avaliação também poderá ser realizada num plano óptico de elevada qualidade superficial. Dos estudos realizados por um laboratório internacional congénere do IPQ [29], a avaliação desta componente de

incerteza é obtida através do desvio-padrão do parâmetro de rugosidade  $R_z$ . A estimativa da incerteza-padrão é dada pela Equação 7.11:

$$u_4(y) = u(Zn) = \sqrt{\frac{(\overline{Rz_0})^2}{12}} \quad \text{Equação 7.11}$$

Exemplo:

Tabela 7.9 – Ruído do sistema. Exemplo para o apalpador RFHTB-50,  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ .

Medição	$R_z (\mu\text{m})$
1	0,008
2	0,008
3	0,008
4	0,017
5	0,010
6	0,012
7	0,006
8	0,007
9	0,008
10	0,008
11	0,008
12	0,009

Média	0,009 $\mu\text{m}$
Desvio-Padrão	0,003 $\mu\text{m}$
Máximo	0,017 $\mu\text{m}$
Mínimo	0,006 $\mu\text{m}$

$$u_4(y) = u(Zn) = \sqrt{\frac{(\overline{Rz_0})^2}{12}} = \sqrt{\frac{(0,009)^2}{12}} = 2,6 \times 10^{-3} \mu\text{m} \quad \text{Equação 7.12}$$

- **Reprodutibilidade do processo de medição,  $u_5(y)$**

O parâmetro de rugosidade  $R_x$ , em avaliação, é determinado através da média das  $n$  medições (tipicamente 12 medições) efectuadas em diferentes localizações do padrão de rugosidade a ser calibrado. O desvio padrão,  $s(Rx)_{reprod}$ , dessas medições caracteriza a uniformidade do padrão e contribui para a Incerteza de Medição, tal como mostra a Equação 7.13:

$$u_5(y) = u(Rx)_{reprod} = \sqrt{\frac{s^2(Rx)_{reprod}}{n}} \quad \text{Equação 7.13}$$

Nota: No presente estudo foram realizadas  $n = 3$  medições, pelo que no cálculo de  $u_5(y)$  apenas foi contabilizado o desvio padrão dessas medições.

Na tabela que se segue (Tabela 7.10), é apresentado o resumo das grandezas dos componentes de fontes de incerteza significativas presentes na calibração de Padrões de Rugosidade Tipo C e D.

Tabela 7.10 – Balanço de Melhor Incerteza [23].

Grandeza $X_i$	Estimativa $x_i$	Incerteza- Padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade $c_i$	Contribuição para a Incerteza-Padrão $u_i(y)$	Distribuição/ Avaliação	$\nu_i$
Padrão Tipo A1		$u(d_n)$	1	$\sqrt{\frac{U_n^2}{4}}$	Normal/ Tipo B	50
Transferência do valor padrão		$u(dm_{repet})$	1	$\sqrt{s^2(dm_{repet})}$	Normal/ Tipo A	4
Factor de Calibração		$u(C)$	1	$\sqrt{\frac{1}{dm^2} \times [u^2(dm) + u^2(dn)]}$	Normal/ Tipo A	4
Ruído do Sistema		$u(Zn)$	1	$\sqrt{\frac{(\overline{Rz_0})^2}{12}}$	Normal/ Tipo A	11
Reprodutibilidade		$u(Rx)_{reprod}$	1	$\sqrt{\frac{s^2(Rx)_{reprod}}{12}}$	Normal/ Tipo A	11

A Incerteza Padrão Combinada é determinada através da Equação 7.14:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^5 u_i^2(y)} \quad \text{Equação 7.14}$$

Finalmente, recorrendo-se à Equação 3.15 procede-se ao cálculo da Incerteza de Medição Expandida ( $U$ ), considerando um factor de expansão,  $k = 2$ .

No seguimento do explicitado acima, mostram-se de seguida as tabelas com os resultados das medições, e as respectivas Incertezas de Medição Expandidas.

Tabela 7.11 – Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$  e  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rz)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rt)$ ( $\mu\text{m}$ )
-1,010	3,063	0,059	9,805	0,138	9,915	0,315
-0,760	3,071	0,057	9,813	0,129	9,914	0,323
-0,497	3,066	0,057	9,807	0,114	9,914	0,317
-0,257	3,063	0,055	9,805	0,121	9,912	0,346
-0,003	3,060	0,055	9,792	0,093	9,913	0,328
0,257	3,055	0,054	9,769	0,121	9,877	0,361
0,507	3,051	0,054	9,764	0,101	9,867	0,336
0,763	3,052	0,054	9,777	0,102	9,901	0,342
1,003	3,056	0,054	9,796	0,123	9,919	0,331

Tabela 7.12 - Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$  e  $lt = 5,6 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rz)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rt)$ ( $\mu\text{m}$ )
-0,993	3,078	0,053	9,993	0,102	10,125	0,291
-0,747	3,079	0,053	9,998	0,117	10,137	0,310
-0,493	3,079	0,053	9,989	0,122	10,122	0,321
-0,250	3,076	0,053	9,977	0,096	10,094	0,251
0,010	3,076	0,054	9,987	0,119	10,125	0,295
0,250	3,076	0,054	9,985	0,093	10,119	0,217
0,493	3,074	0,054	9,978	0,130	10,118	0,360
0,743	3,073	0,054	9,986	0,093	10,130	0,217
0,997	3,0766	0,056	9,990	0,099	10,117	0,246

Tabela 7.13 - Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$  e  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rz)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rt)$ ( $\mu\text{m}$ )
-1,017	2,173	0,768	7,247	1,796	10,015	0,531
-0,757	3,064	0,058	9,835	0,118	10,003	0,489
-0,490	3,059	0,058	9,863	0,167	10,056	0,370
-0,257	3,055	0,058	9,809	0,150	9,981	0,504
-0,007	3,055	0,058	9,796	0,103	9,953	0,428
0,240	3,048	0,058	9,774	0,115	9,955	0,482
0,503	3,043	0,058	9,767	0,083	9,972	0,439
0,747	3,040	0,058	9,765	0,095	9,967	0,448
0,997	3,039	0,058	9,766	0,099	9,971	0,434

Tabela 7.14 - Incerteza de Medição Expandida dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$  e  $lt = 5,6 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rz$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rz)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rt$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rt)$ ( $\mu\text{m}$ )
-0,987	3,059	0,058	10,055	0,075	10,266	0,316
-0,753	3,057	0,058	10,053	0,078	10,253	0,286
-0,490	3,058	0,058	10,064	0,123	10,323	0,440
-0,240	3,059	0,058	10,084	0,098	10,367	0,331
0,000	3,059	0,058	10,088	0,085	10,379	0,451
0,250	3,058	0,058	10,049	0,096	10,241	0,338
0,513	3,060	0,058	10,064	0,100	10,275	0,313
0,747	3,059	0,058	10,048	0,076	10,218	0,363
0,987	3,060	0,060	10,041	0,061	10,156	0,262

Conclusões:

Pela análise das tabelas 7.11 a 7.14, pode concluir-se que a variação da inclinação tem influência reduzida nos valores de rugosidade medidos ( $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ ) e nos valores calculados da Incerteza de Medição Expandida ( $U$ ). Esta conclusão seria esperada, uma vez que o valor máximo admissível da gama de inclinação, definido pelo Procedimento Técnico de Calibração de Apalpadores, é igual a  $\pm 0,10 \mu\text{m/mm}$ . Este estudo permite ainda avaliar o quanto um valor de inclinação diferente de  $\pm 0,10 \mu\text{m/mm}$  influencia o valor do parâmetro de rugosidade em questão.

### 7.3 Avaliação da compatibilidade metrológica de resultados

A avaliação da compatibilidade metrológica – *Propriedade dum conjunto de resultados de medição correspondentes a uma mensuranda especificada, tal que o valor absoluto da diferença entre os valores medidos de todos os pares de resultados de medição é menor que um certo múltiplo escolhido da incerteza-padrão desta diferença* [1] - dos resultados de medição é obtida através do cálculo do erro normalizado ( $E_n$ ) (Equação 7.15), em que  $x_i$  e  $x_{ref}$  representam o resultado de cada uma das medições e o resultado do valor de referência, respectivamente, e  $U_i$  e  $U_{ref}$  as respectivas incertezas de medição expandidas associadas. O resultado de cada medição/calibração é satisfatório se  $|E_n| \leq 1$ .

$$E_n = \frac{x_i - x_{ref}}{\sqrt{U_i^2 + U_{ref}^2}} \quad \text{Equação 7.15}$$

Valores de referência ( $x_{ref}$ ,  $U_{ref}$ ) utilizados para a realização deste estudo correspondem ao processo de calibração do padrão de rugosidade (CC 101.40/1440260) e foram obtidos com as seguintes condições de medição:

Inclinação ( $\cong 0,00 \mu\text{m}/\text{mm}$ ), com o apalpador RFHTB, com amplitude de medição de  $\pm 25 \mu\text{m}$ , com  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$ ,  $lt = 5,6 \text{ mm}$ :

Tabela 7.15 – Valores de referência da calibração do padrão.

$x_{ref} (\mu\text{m})$		$U_{ref} (\mu\text{m})$	
$Ra$	3,04	$Ra$	0,07
$Rmax$	9,91	$Rmax$	0,10
$Rz$	9,85	$Rz$	0,08
$Rt$	9,93	$Rt$	0,09

Valores obtidos para o erro normalizado:

Tabela 7.16 – Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$  e  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$Ra (\mu\text{m})$	$En (Ra)$	$Rz (\mu\text{m})$	$En (Rz)$	$Rt (\mu\text{m})$	$En (Rt)$
-1,010	3,063	-0,1	9,805	-0,8	9,915	-0,3
-0,760	3,071	0,0	9,813	-0,8	9,914	-0,3
-0,497	3,066	0,0	9,807	-0,9	9,914	-0,3
-0,257	3,063	-0,1	9,805	-0,9	9,912	-0,3
-0,003	3,060	-0,1	9,792	-1,2	9,913	-0,3
0,257	3,055	-0,1	9,769	-1,2	9,877	-0,4
0,507	3,051	-0,2	9,764	-1,4	9,867	-0,4
0,763	3,052	-0,2	9,777	-1,2	9,901	-0,3
1,003	3,056	-0,1	9,796	-1,0	9,919	-0,3

Tabela 7.17 - Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 5 \mu\text{m}$  e  $lt = 5,6 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	$Ra (\mu\text{m})$	$En (Ra)$	$Rz (\mu\text{m})$	$En (Rz)$	$Rt (\mu\text{m})$	$En (Rt)$
-0,993	3,078	0,1	9,993	0,4	10,125	0,3
-0,747	3,079	0,1	9,998	0,4	10,137	0,4
-0,493	3,079	0,1	9,989	0,3	10,122	0,3
-0,250	3,076	0,1	9,977	0,3	10,094	0,3
0,010	3,076	0,1	9,987	0,3	10,125	0,3
0,250	3,076	0,1	9,985	0,4	10,119	0,4
0,493	3,074	0,1	9,978	0,2	10,118	0,3
0,743	3,073	0,1	9,986	0,4	10,130	0,5
0,997	3,076	0,1	9,990	0,4	10,117	0,4



Tabela 7.18 - Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$  e  $lt = 17,5 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$Ra (\mu\text{m})$	$En (Ra)$	$Rz (\mu\text{m})$	$En (Rz)$	$Rt (\mu\text{m})$	$En (Rt)$
-1,017	2,173	-1,1	7,247	-1,5	10,015	0,1
-0,757	3,064	0,2	9,835	-0,3	10,003	0,1
-0,490	3,059	0,1	9,863	0,0	10,056	0,3
-0,257	3,055	0,1	9,809	-0,4	9,981	0,1
-0,007	3,055	0,1	9,796	-0,6	9,953	0,0
0,240	3,048	0,0	9,774	-0,7	9,955	0,0
0,503	3,043	0,0	9,767	-0,9	9,972	0,0
0,747	3,040	-0,1	9,765	-0,9	9,967	0,0
0,997	3,039	-0,1	9,766	-0,9	9,971	0,0

Tabela 7.19 - Erro Normalizado ( $En$ ) dos parâmetros  $Ra$ ,  $Rz$  e  $Rt$ , para apalpador com  $r_{tip} = 2 \mu\text{m}$  e  $lt = 5,6 \text{ mm}$ .

Inclinação ( $\mu\text{m/mm}$ )	$Ra (\mu\text{m})$	$En (Ra)$	$Rz (\mu\text{m})$	$En (Rz)$	$Rt (\mu\text{m})$	$En (Rt)$
-0,987	3,059	0,1	10,055	1,7	10,266	1,0
-0,753	3,057	0,1	10,053	1,6	10,253	1,0
-0,490	3,058	0,1	10,064	1,3	10,323	0,8
-0,240	3,059	0,1	10,084	1,7	10,367	1,2
0,000	3,059	0,1	10,088	1,8	10,379	0,9
0,250	3,058	0,1	10,049	1,4	10,241	0,8
0,513	3,060	0,1	10,064	1,5	10,275	1,0
0,747	3,059	0,1	10,048	1,6	10,218	0,7
0,987	3,060	0,1	10,041	1,7	10,156	0,7

#### Conclusões:

Quando as condições de medição (comprimento total, raio do *stylus*) são as mesmas para a obtenção dos valores de referência e para as medições sobre o padrão quando se varia a inclinação, verifica-se que os valores dos parâmetros de rugosidade avaliados são compatíveis, podendo dizer-se que são independente da inclinação do padrão (Tabela 7.17,  $En < 1$ ).

Quando o comprimento total e o raio do *stylus* são diferentes das condições de medição utilizadas para a obtenção dos valores de referências, a compatibilidade metrológica dos resultados de medição nem sempre se verifica.

Estes resultados vão de encontro ao normalizado em que se define que o padrão de rugosidade a utilizar para a calibração do rugosímetro industrial deve ter a calibração para os parâmetros de rugosidade e amplitudes de medição a medir com esse rugosímetro.

Dos resultados obtidos no presente capítulo, fica em aberto a quantificação e a necessidade da introdução de uma nova componente de incerteza, no balanço de incertezas, a devida ao erro de inclinação observado aquando das medições, propondo-se a sua avaliação, por exemplo, através de uma avaliação de incerteza do tipo B, em que os limites de variabilidade correspondam à variação do valor do parâmetro de rugosidade em avaliação.

## 8 Verificação e calibração “*in situ*” de um rugosímetro industrial

Para o presente trabalho, foram analisados os acabamentos de superfícies de peças obtidas através de diferentes processos de fabrico, com a utilização de um rugosímetro industrial. As peças foram obtidas por fundição, corte por serra e polimento.

O rugosímetro industrial utilizado, existente no Instituto de Ciência e Engenharia de Materiais e Superfícies (ICEMS), foi o modelo Surftest SJ-201P da Mitutoyo, com um raio do *stylus* de 2  $\mu\text{m}$  e uma amplitude de medição em modo automático (Figura 8.1). O comprimento amostral ( $l_r$ ), de avaliação ( $l_n$ ) e total de medição ( $l_t$ ), utilizados nas medições foram os seguintes:  $l_r = 0,8 \text{ mm}$ ,  $l_n = 5 \times l_r$ ,  $l_t = 7 \times l_r = 5,6 \text{ mm}$ .

Com o rugosímetro industrial mediu-se o padrão (de referência), obtendo-se os valores apresentados na Tabela 8.1 (correspondentes a “Antes de calibração”). Realizou-se a calibração do rugosímetro industrial no IPQ, de acordo com o procedimento descrito anteriormente, após a qual se voltou a medir o padrão (de referência), obtendo-se os valores da Tabela 8.1 correspondentes a “Após calibração”, já com o padrão de rugosidade e o rugosímetro industrial devidamente calibrados. Este estudo teve como finalidade averiguar a importância que a calibração tem quer nos sistemas de medição dos rugosímetros quer nos padrões de rugosidade.

### 8.1 Calibração de um rugosímetro industrial

Para a realização da calibração do rugosímetro industrial foi utilizado um padrão de rugosidade Tipo C, com valor nominal de  $Ra = 2,97 \mu\text{m}$  e  $Rmax^2 = 9,4 \mu\text{m}$  (Figura 8.1).

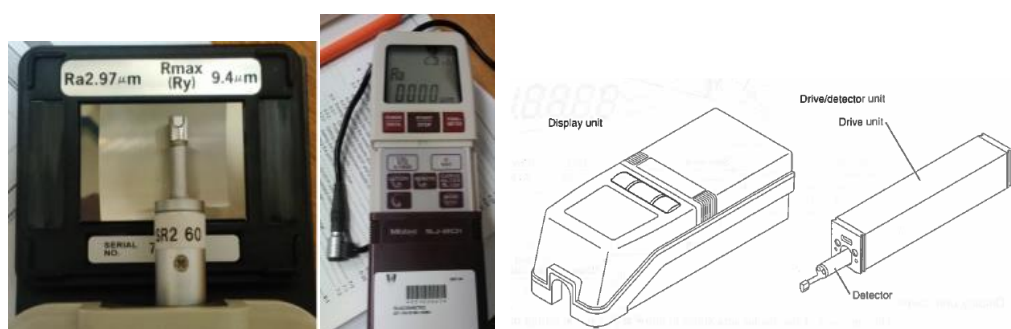


Figura 8.1 - Padrão de rugosidade Tipo C, apalpador (*stylus*) e unidade de leitura do rugosímetro industrial.

<sup>2</sup> Parâmetro não definido nas normas actualmente em vigor. A norma DIN 4768, que definia o parâmetro de rugosidade  $Rmax$  e cujo valor nominal é apresentado no padrão, foi anulada.

O processo de calibração envolve a medição de um padrão de rugosidade de referência e o respectivo ajuste da diferença de valores obtidos, caso exista, entre os valores medidos sobre o padrão de rugosidade de referência e os valores inscritos no padrão de rugosidade de referência (valores de referência, Figura 8.1).

Dependendo do uso dado ao rugosímetro, assim a calibração deverá ser realizada periodicamente. Complementariamente, se o rugosímetro for utilizado pela primeira vez, ou caso o apalpador tiver sido acabado de colocar, ou caso tenha sido substituído por outro apalpador, então a calibração torna-se num processo essencial.

Fundamentalmente, sem a devida e bem efectuada calibração do rugosímetro, não se conseguem obter resultados fiáveis e correctos.

### 8.1.1 Preparação para a calibração

- 1) Posicionou-se o padrão de rugosidade de referência e o suporte de calibração numa mesa nivelada (Figura 8.2)

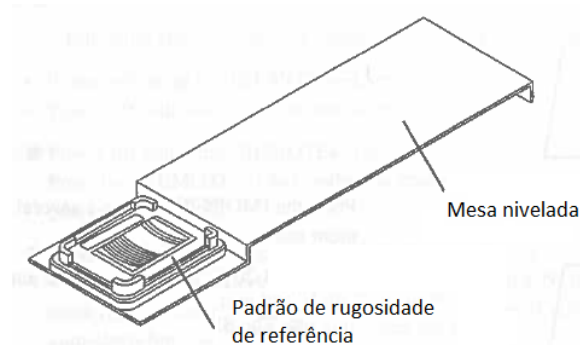


Figura 8.2 – Calibração do rugosímetro industrial. Primeiro passo.

- 2) Colocou-se o rugosímetro sobre a mesa de calibração nivelada (Figura 8.3)

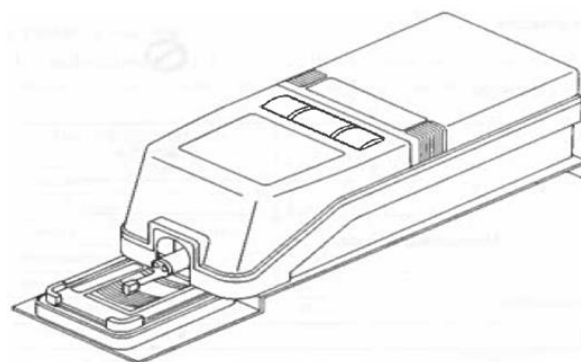


Figura 8.3 - Calibração do rugosímetro industrial. Segundo passo.

- 3) Colocou-se o rugosímetro de modo a que a direcção de avanço do apalpador fosse perpendicular à direcção das estrias de superfície do padrão de rugosidade de referência (Figura 8.4)

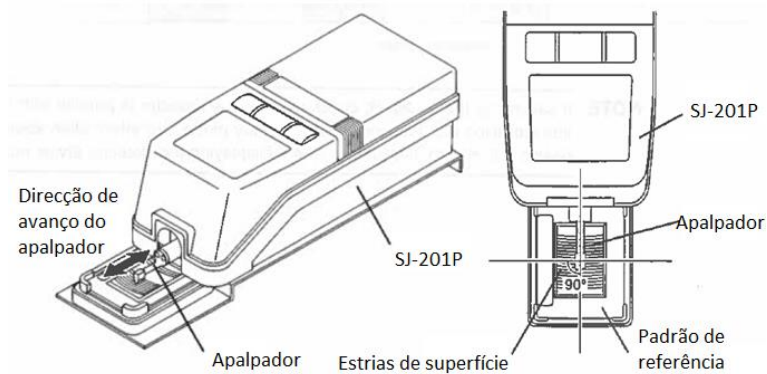


Figura 8.4 - Calibração do rugosímetro industrial. Terceiro passo.

- 4) Confirmou-se que o apalpador se encontra paralelo à superfície de medição (Figura 8.5)

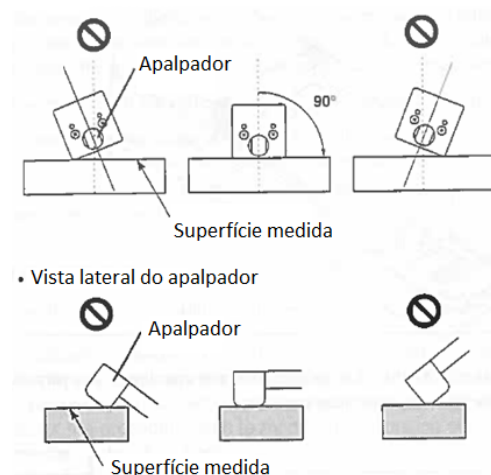


Figura 8.5 - Calibração do rugosímetro industrial. Quarto passo: definição da inclinação.

### 8.1.2 Procedimento de calibração

Para fazer a calibração do equipamento seleccionou-se a opção:

- “[CAL/STD/RANGE]”, no modo de medição do rugosímetro, tendo sido exibido o actual valor de calibração. Neste estado, o valor de calibração indicado pode ser modificado (Figura 8.6), caso o valor de calibração apresentado seja diferente do inscrito no padrão de rugosidade de referência.

Nota: As figuras que se seguem referem-se a um exemplo de calibração, não sendo os valores apresentados correspondentes aos do trabalho realizado.

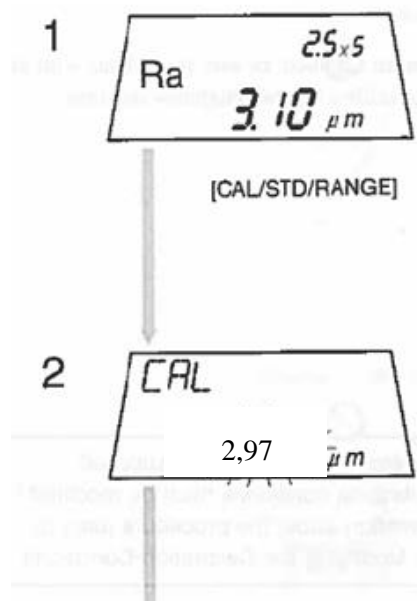


Figura 8.6 – Procedimento de calibração do rugosímetro industrial. Primeiro passo.

- Pressionando a tecla “[n/ENT]”, o novo valor de calibração (introduzido) é então definido (Figura 8.7)

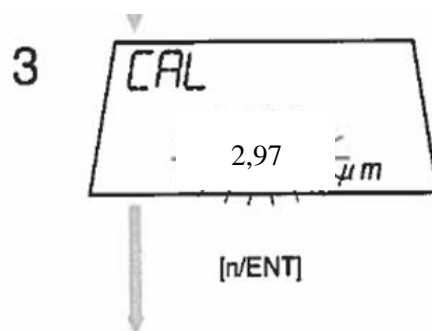


Figura 8.7 - Procedimento de calibração do rugosímetro industrial. Segundo passo.

- Pressionando a tecla “[START/STOP]” é realizada uma medição de calibração sobre o padrão de rugosidade de referência, sendo apresentado o seguinte símbolo: “----”, durante a medição de calibração (enquanto o apalpador percorre a superfície de medição do padrão de rugosidade de referência) (Figura 8.8).
- Quando a medição de calibração está completa, o valor medido é apresentado. Nesta altura, ao pressionar a tecla “[n/ENT]” o factor de calibração é actualizado, completando desta forma o processo de calibração do rugosímetro (Figura 8.8).

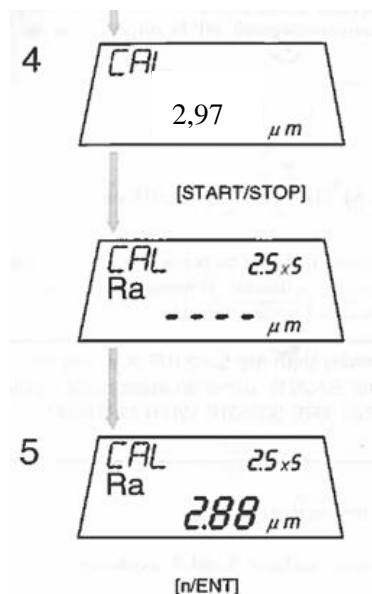


Figura 8.8 - Procedimento de calibração do rugosímetro industrial. Terceiro passo.

### 8.1.3 Resultados obtidos antes e após a calibração do rugosímetro industrial

Tabela 8.1 – Valores dos parâmetros de rugosidade medidos antes e após a calibração do rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-201P (3 medições de rugosidade por linha, 4 linhas de medição).

Padrão de rugosidade Nº de Série 731125	$Ra$ ( $\mu m$ )	$Rmax$ ( $\mu m$ )
Antes calibração	$3,01 \pm 0,10$	$9,9 \pm 0,33$
Após calibração	$2,95 \pm 0,05$	$9,6 \pm 0,20$
Valor de referência CC IPQ:101.40/1441442	$2,97 \pm 0,10$	$9,4 \pm 0,03$

Da análise dos trabalhos experimentais, verifica-se a importância que a calibração tem nos equipamentos de rugosidade. No presente caso de estudo, pode-se verificar que após a calibração do rugosímetro industrial, os valores medidos por este sobre o padrão de rugosidade estão bem mais próximos dos valores apresentados no padrão do que estavam antes de ser efectuada a calibração.

Nota: De modo a garantir a repetibilidade dos resultados obtidos, foram efectuadas 3 medições, sobre o padrão de rugosidade de referência, na mesma linha de traçagem, sendo os resultados apresentados nas tabelas os correspondentes à média dos resultados dessas 3 medições.

## 8.2 Análise Metrológica de acabamentos superficiais

Foram analisados os acabamentos de superfície de peças obtidas através de diferentes processos de fabrico, com a utilização de um rugosímetro industrial. Os parâmetros de rugosidade, foram obtidos de acordo com a norma de referência ISO 4287:1997 e as medições de perfil obtiveram-se utilizando o rugosímetro industrial **modelo Surftest SJ-201P da Mitutoyo**, com um raio do *stylus* de 2  $\mu\text{m}$  e amplitude de medição em modo automático.

Foram efetuadas medições de perfis para comprimento amostral ( $l_r$ ), de avaliação ( $l_n$ ) e total de medição ( $l_t$ ) de:  $l_r = 0,8 \text{ mm}$ ,  $l_n = 5 \times l_r = 4 \text{ mm}$ ,  $l_t = 7 \times l_r = 5,6 \text{ mm}$ .

## 8.3 Resultados de medição

Resultados para os parâmetros de rugosidade de acordo com a norma de referência ISO 4287:1997, obtidos nas medições de perfil utilizando o rugosímetro industrial. O Resultado de Medição corresponde ao valor médio das medições, considerando 3 a 4 zonas de medição distintas, conforme a superfície em avaliação.

Para o cálculo da Incerteza de Medição Expandida ( $U$ ), das 5 fontes de incertezas referidas no capítulo 7.2 – “Balanço de Incerteza dos valores de medição”, apenas não foi possível analisar a componente “ruído”, devido à inexistência de um plano óptico de elevada qualidade. Foram então analisadas as seguintes fontes de incerteza consideradas: “repetibilidade”, “reprodutibilidade”, “calibração do padrão de rugosidade” e “transferência do valor padrão”.

Relativamente à componente “repetibilidade”, esta foi obtida através do valor máximo dos desvios-padrões obtidos para a mesma zona de medição.

A componente “reprodutibilidade” foi contabilizada através do cálculo do desvio padrão da média dos resultados obtidos para as diferentes zonas de medição.

Quanto à componente “calibração do padrão de rugosidade”, é obtida através do Certificado de Calibração N° 101.40/1441442 do IPQ, sendo o seu valor de 0,148  $\mu\text{m}$  e de 0,469  $\mu\text{m}$ , para os parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_{max}$ , respectivamente.

Por último, a contabilização da fonte de incerteza “transferência do valor padrão” é feita através do desvio-padrão obtido no Certificado de Calibração N° 101.40/1441442 do IPQ para o parâmetro em causa, sendo o seu valor de 0,01  $\mu\text{m}$  e de 0,02  $\mu\text{m}$  para os parâmetros de rugosidade  $R_a$  e  $R_{max}$ , respectivamente.



Nota: Apenas para a superfície obtida por polimento não foi contabilizada a fonte de incerteza “calibração do padrão de rugosidade”, por não ser considerada fonte de incerteza para este caso.

Exemplo:

Tabela 8.2 – Resultados obtidos para o parâmetro  $R_{max}$ . Exemplo para a superfície obtida por polimento.

Zona/Parâmetro	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )
a1	0,25
a2	0,34
a3	0,25

Média	0,28
Desvio-Padrão	0,05

b1	0,39
b2	0,35
b3	0,40

Média	0,38
Desvio-Padrão	0,03

c1	0,36
c2	0,36
c3	0,40

Média	0,37
Desvio-Padrão	0,02

No presente exemplo, a componente “repetibilidade” tem o valor de 0,05  $\mu\text{m}$ . A componente “reprodutibilidade” apresenta portanto o valor de 0,06  $\mu\text{m}$ . Como referido anteriormente, para o parâmetro de rugosidade  $R_{max}$ , o valor da fonte de incerteza “transferência do valor padrão” é de 0,02  $\mu\text{m}$ , sendo desprezado o valor da fonte de incerteza “calibração do padrão de rugosidade”.

Assim, e de acordo com a Equação 3.15, o valor da Incerteza de Medição Expandida ( $U$ ) é (Equação 8.1):

$$U = 2 \times \sqrt{0,05^2 + 0,06^2 + 0,02^2} = 0,16 \mu\text{m} \quad \text{Equação 8.1}$$

### 8.3.1 Superfície obtida por corte por serra

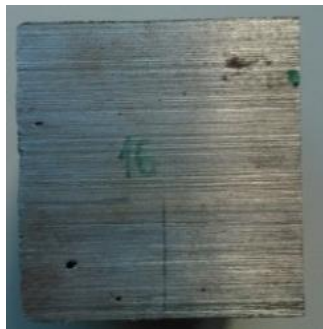


Figura 8.9 – Superfície obtida por corte por serra.

Tabela 8.3 - Resultados para a superfície obtida por corte por serra.

$l_t$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rmax^3$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rmax)$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	4,50	1,11	32,74	16,69

### 8.3.2 Superfície obtida por fundição



Figura 8.10 – Superfície obtida por fundição em molde de areia.

Tabela 8.4 - Resultados para a superfície obtida por fundição em molde de areia.

$l_t$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rmax$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Rmax)$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	8,96	0,95	60,23	16,34

---

<sup>3</sup> Parâmetro não definido nas normas atualmente em vigor. A norma DIN 4768, que definia o parâmetro de rugosidade  $Rmax$  e cujo valor nominal é apresentado no padrão foi anulada.

### 8.3.3 Superfície obtida por polimento



Figura 8.11 – Superfície obtida por polimento.

Tabela 8.5 – Resultados para a superfície obtida por polimento.

$l_t$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_{max})$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	0,04	0,02	0,40	0,16

Resultados de medição, obtidos com o **Rugosímetro Mahr, Modelo Perthometer do IPQ**

Resumo do método:

Os parâmetros de rugosidade foram avaliados, utilizando um instrumento de medição por contacto (*stylus*), de acordo com as normas ISO 3274:1996 e ISO 4288:1996. Foram efetuadas medições de perfis, com o apalpador RFHTB-250 ( $r = 2 \mu\text{m}$  e amplitude de medição de  $\pm 250 \mu\text{m}$ ) para vários valores de comprimento total, distribuídos sobre a superfície e usando um filtro de Gauss.

### 8.3.4 Superfície obtida por corte por serra (IPQ)

Tabela 8.6 - Resultados para a superfície obtida por corte por serra (IPQ).

$l_t$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(Ra)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_{max})$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	4,72	0,81	34,00	8,64

Resultados em função de  $l_t$ :

Tabela 8.7 – Evolução dos parâmetros  $Ra$  e  $Rmax$  em função de  $lt$ , para a superfície obtida por corte por serra (IPQ).

$lt$ (mm)	$Ra$ ( $\mu\text{m}$ )	$Rmax$ ( $\mu\text{m}$ )
0,56	0,69	3,48
1,75	2,04	9,64
5,6	4,72	34
17,5	5,11	40,77

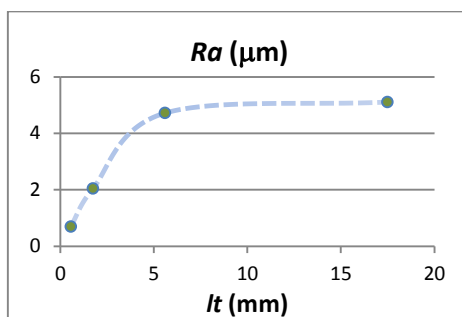


Gráfico 8.1 – Evolução do parâmetro de rugosidade  $Ra$  em função de  $lt$ , para a superfície obtida por corte por serra.

#### Conclusão:

O estudo, realizado a partir da amostra obtida pelo processo de fabrico por corte por serra, permite dizer que o comprimento total a avaliar para a caracterização da superfície com este tipo de acabamento superficial, deve ser no mínimo de  $lt = 5,6$  mm, pois do gráfico verifica-se que para  $lt$  superiores a 5,6 mm o valor de  $Ra$  tende a estabilizar. A especificação de fabrico para este tipo de acabamento de modo a que o parâmetro de Rugosidade  $Ra$  seja independentemente do rugosímetro a utilizar, deverá ser realizada para um  $lt = 5,6$  mm.

## 9 Conclusões

A garantia de que uma peça tem as mesmas especificações metroológicas de acabamento de superfície, independentemente do local de fabrico, é actualmente conseguida através da utilização das normas técnicas internacionais (ISO), aquando da sua produção e aquando da sua análise metroológica, a qual implica a calibração dos padrões de rugosidade e rugosímetros, de acordo com as especificações do produto final.

Da análise dos resultados experimentais, verifica-se a importância que a calibração tem nos equipamentos de medição de rugosidade. No presente trabalho, pode-se verificar que após a calibração do rugosímetro industrial, os valores medidos por este sobre o padrão de rugosidade estão bem mais próximos dos valores apresentados no padrão de rugosidade do que estavam antes de ser efectuada a calibração.

Apesar dos resultados obtidos através do rugosímetro do Laboratório Nacional de Metrologia serem mais exactos (menos incerteza associada) que os obtidos pelo rugosímetro industrial, verifica-se que os mesmos são compatíveis, o que confere um elevado grau de confiança aquando da utilização destes rugosímetros industriais calibrados.

Verificou-se ainda, através da análise dos valores obtidos para as diferentes peças que:

- A gama de valores das amostras “corte por serra”, “polido” encontram-se dentro dos valores esperados teoricamente;
- Da análise de resultados de rugosidade na amostra da peça obtida por fundição, pode-se concluir que se trata de uma peça obtida por fundição em molde de areia.

Num rugosímetro, a informação acerca da superfície a avaliar é detectada pelo apalpador, podendo sofrer distorções não controladas, devido por exemplo à forma do *stylus*, às irregularidades presentes nos padrões de rugosidade ou peças a analisar, ou ao facto de nem sempre a superfície sujeita a análise ter as mesmas especificações metroológicas que os parâmetros calibrados do rugosímetro. Deste modo, conclui-se que a escolha de um apalpador é um factor extremamente importante quando se pretende averiguar o estado do acabamento superficial de uma peça ou padrão de rugosidade, pois sem uma escolha adequada, pode-se danificar quer o apalpador quer a própria peça/padrão de rugosidade em si mesmo, sendo que a reprodutibilidade dos resultados estará posta em causa.

Os parâmetros de rugosidade em análise podem variar de superfície para superfície, pelo que a calibração dos rugosímetros deve ser efectuada periodicamente e antes de qualquer medição da referida superfície, através da utilização de padrões de rugosidade calibrados para os parâmetros de rugosidade a controlar. Apenas assim é possível obter-se compatibilidade entre os valores dos

parâmetros de rugosidade de um padrão calibrado e os valores reais da superfície do componente mecânico a controlar, bem como garantir a reprodutibilidade dos resultados de medição obtidos.

Através dos resultados obtidos para as amostras em análise, conclui-se acerca de qual o valor mínimo que o comprimento total de medição,  $lt$ , a avaliar para a caracterização da superfície deve ter, de modo a que o valor do parâmetro de rugosidade em análise seja independente do rugosímetro a utilizar. Quando o valor do parâmetro medido tende a estabilizar conclui-se que não é necessário aumentar o comprimento total de medição,  $lt$ , pois as características da superfície são repetíveis a partir desse valor.

Propõe-se, como trabalhos futuros, a análise quanto à contabilização de mais uma fonte de incerteza, a adicionar ao balanço de incerteza actual, associada ao erro que se introduz quando se efectua uma medição fora da gama de valores de inclinação definidos como aceitáveis.

## Bibliografia

- [1] IPQ, Vocabulário Internacional de Metrologia - 1ª Edição Luso-Brasileira, JCGM 200:2012, Caparica, 2012.
- [2] P. Guedes, *Metrologia Industrial*, Lisboa: Edições Técnicas e Profissionais, ISBN 978-972-8480-27-1, 2011.
- [3] “Bureau International des Poids et Mesures,” [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/convention/wmd/2004/history.html>. [Acedido em 4 Fevereiro 2014].
- [4] “Instituto Português da Qualidade - Museu Metrologia,” IPQ, [Online]. Available: <http://ipq.pt/museu%20da%20metrologia>. [Acedido em 6 Junho 2014].
- [5] Instituto Português da Qualidade, *Metrologia - em Síntese*, Caparica: Tipografia Peres, 2001.
- [6] “Bureau International des Poids et Mesures,” [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/publications/mro/>. [Acedido em 4 Março 2014].
- [7] “Decreto-Lei nº 71/2012,” *Diário da República, 1.ª série - Nº 58*, 21 de Março de 2012.
- [8] “Instituto Português da Qualidade,” IPQ, [Online]. Available: [www.ipq.pt](http://www.ipq.pt). [Acedido em 18 Maio 2014].
- [9] “Decreto-Lei nº 128/2010,” *Diário da República, 1.ª série - Nº 234*, 3 de Dezembro de 2010.
- [10] “Bureau International des Poids et Mesures,” [Online]. Available: <http://www.bipm.org/en/si/>. [Acedido em 12 Maio 2014].
- [11] GUM, Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008.
- [12] T.V.Vorburger e J.F.Song, “Surface Texture,” *National Institute of Standards and Technology*, pp. 334-345.
- [13] L. V. d. Cunha, *Desenho Técnico*, 14ª Edição, Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, ISBN 978-972-311-066-1, 2008.
- [14] A.Silva, J.Dias e L.Sousa, *Desenho Técnico Moderno*, Lisboa: Lidel, ISBN-10: 972-757-337-1, 2007.
- [15] “Ebah,” [Online]. Available: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfQwwAE/acabamento-superficial>. [Acedido em 24 Janeiro 2014].
- [16] R. Miranda, *Apontamentos da disciplina de Comportamento Mecânico dos Materiais*, Caparica: FCT-UNL/DEMI, 2010.

- [17] ISO 8785:1998 - Geometrical Product Specification (GPS) - Surface Imperfections - Terms, definitions and parameters.
- [18] F.Saraiva, D.Guedes, R.Martins e E.Filipe, ““Rastreabilidade Metrológica em Medições de Rugosidade”, Resumo e Apresentação na CONFMET,” 2014. [Online]. Available: [http://www.spmet.pt/Eventos/ConfMET2014/CONFMET2014\\_Abstracts.html](http://www.spmet.pt/Eventos/ConfMET2014/CONFMET2014_Abstracts.html).
- [19] A. Mourão, *Apontamentos da disciplina da Tecnologias e Processos Mecânicos*, Caparica: FCT-UNL/DEMI, 2010.
- [20] ISO 1302:2002 - Geometrical Product Specification (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation.
- [21] ISO 4288:1996 - Geometrical Product Specification (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Rules and procedures for the assessment of surface texture.
- [22] ISO 4287:1997 - Geometrical Product Specification (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Terms, definitions and surface texture parameters.
- [23] F.Saraiva, Procedimento Técnico 1014097512-08 - Calibração de Padrões de Rugosidade tipo C e D, Caparica: LCM - Instituto Português da Qualidade, 2013.
- [24] J. M. R. Tavares, “Indicação dos Estados de Superfície,” FEUP, [Online]. Available: <http://paginas.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC-G/Downloads/Apontamentos/Estado%20de%20Superficies.pdf>. [Acedido em 19 Março 2014].
- [25] ISO 5436-1:2000 - Geometrical Product Specification (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Measurement Standards - Part 1 - Material measures.
- [26] J.Garnaes, N.Kofod, A.Kuhle, C.Nielson, K.Dirscherl e L.Blunt, “Calibration of step heights and roughness measurements with atomic force microscope,” *Precision Engineering*, pp. 91-98, 2002.
- [27] ISO 3274:1996 - Geometrical Product Specification (GPS) - Surface Texture: Profile Method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments.
- [28] F.Saraiva, Procedimento Técnico 1014005504-03 - Calibração de Apalpadores - Perthometer Concept V 7.21, Caparica: LCM - Instituto Português da Qualidade, 2013.
- [29] PTB, Anexo A: " Uncertainty of measurement in the calibration of roughness standards" de "Calibration of measuring instruments and standards for roughness measuring technique", 2001.
- [30] Surface Roughness Tester SJ-201 - User's Manual, Mitutoyo, No.99MBB079A6.
- [31] J.Raja, B.Muralikrishnan e S. Fu, “Recent advances in separation of roughness, waviness and form,” *Precision Engineering*, pp. 222-235, 2002.
- [32] T. Vorburger, “Methods for Characterizing Surface Topography,” *National Institute of Standards and Technology*, pp. 137-151, 2010.



## **Anexos**



## Anexo I - Exemplos de aplicação da norma ISO 1302:2002

Tabela I.0.1 – Exemplos de símbolos gráficos com indicação do acabamento de superfície Tabela adaptada de [20].

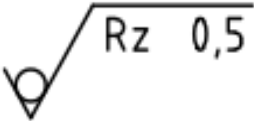
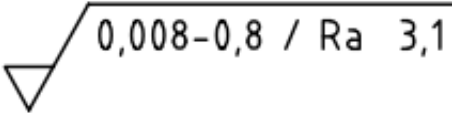
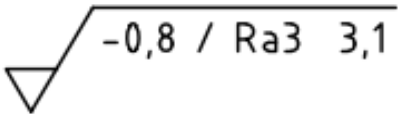
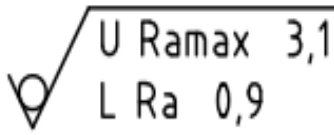
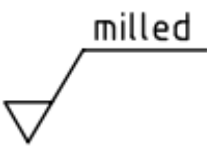
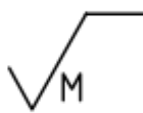


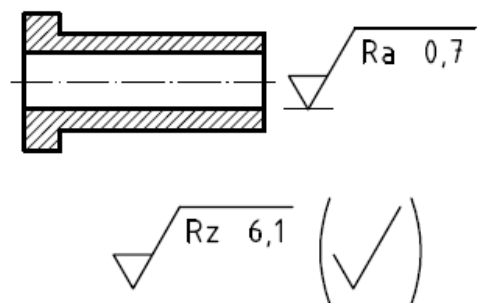
Símbolo	Significado / Explicação
	O processo não permite a remoção de material; limite de especificação superior unilateral; banda de transmissão/comprimento amostral padrão; perfil de rugosidade (R), altura máxima do perfil ( $R_z$ ) de 0,5 $\mu\text{m}$ , comprimento de avaliação de 5 comprimentos amostrais (valor padrão); regra dos 16% (padrão).
	O processo implica a remoção de material, limite de especificação superior unilateral; gama de banda de transmissão/comprimento amostral: 0,008-0,8 mm; perfil de rugosidade (R); desvio médio aritmético do perfil avaliado ( $R_a$ ) de 3,1 $\mu\text{m}$ ; comprimento de avaliação de 5 comprimentos amostrais (padrão); regra dos 16% (padrão).
	O processo requer a remoção de material, limite de especificação superior unilateral; banda de transmissão/comprimento amostral de 0,8 mm; perfil de rugosidade (R); desvio médio aritmético do perfil avaliado ( $R_a$ ) de 3,1 $\mu\text{m}$ ; comprimento de avaliação compreendido em 3 comprimentos amostrais; regra dos 16% (padrão).
	No processo não é permitido a remoção de material; limites de especificação bilateral superior (“U”) e inferior (“L”); banda de transmissão padrão para ambos os limites; perfil de rugosidade (R); <u>limite superior</u> : desvio médio aritmético do perfil avaliado ( $R_a$ ) de 3,1 $\mu\text{m}$ , comprimento de avaliação de 5 comprimentos amostrais (padrão); regra do valor máximo; <u>limite inferior</u> : desvio médio aritmético do perfil avaliado ( $R_a$ ) de 0,9 $\mu\text{m}$ ; comprimento de avaliação de 5 comprimentos amostrais (padrão); regra dos 16% (padrão).

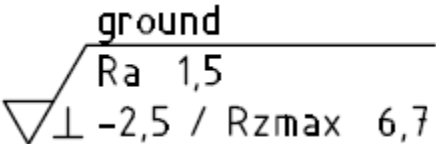
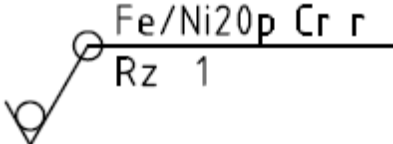
Tabela I.0.2 – Exemplos de símbolos gráficos contendo informação suplementar Tabela adaptada de [20].

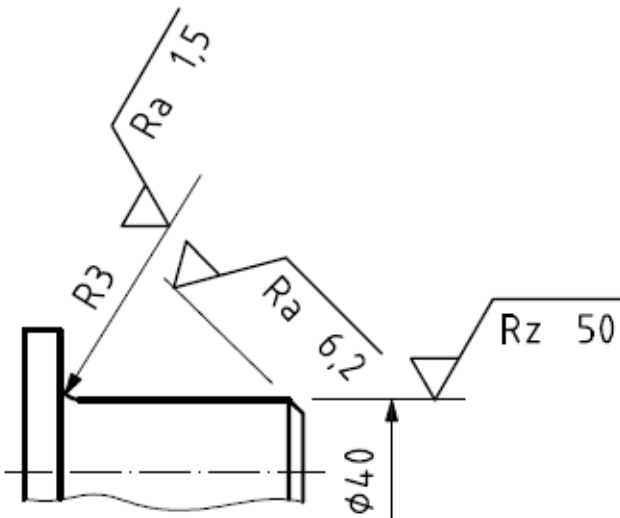
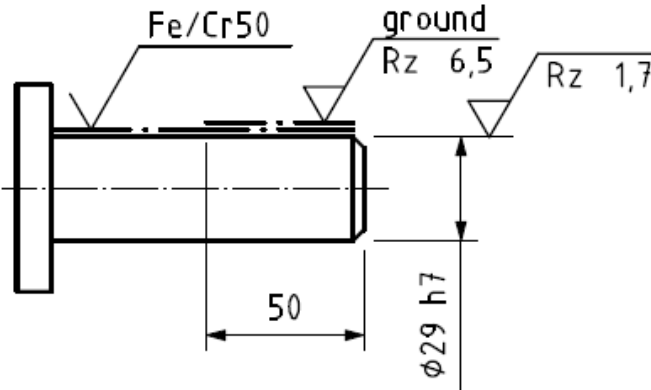
Símbolo	Significado
	Processo de fabrico: esmerilamento.
	Padrão de superfície: direcção multidireccional das estrias de superfície.
	Requisito de acabamento de superfície sem remoção de material, aplica-se a contorno fechado da vista de projecção.
	Sobre-espessura de maquinação/acabamento de 3 mm.

Nota: O método de fabrico, padrão de superfície e sobre-espessura de maquinação/acabamento são dados como únicos exemplos [20].

Tabela I.0.3 – Exemplos de símbolos gráficos com indicação de requisitos de acabamentos de superfície. Tabela adaptada de [20].

Requisito	Exemplo
<p>Rugosidade superficial geral em todas as superfícies, excepto numa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Um único limite de especificação superior unilateral, <math>R_z = 6,1 \mu\text{m}</math>, regra dos 16% (padrão); comprimento de avaliação padrão (<math>5 \times \lambda_c</math>), direcção e orientação das estrias de superfície sem requisito; processo de fabrico deve contemplar a remoção de material;</li> </ul> <p>A superfície com um requisito diferente tem uma rugosidade superficial:</p>	

<p>- Um único limite de especificação, superior unilateral; <math>Ra = 0,7 \mu\text{m}</math>; regra dos 16% (padrão); banda de transmissão/comprimento amostral padrão; comprimento de avaliação padrão (<math>5 \times \lambda_c</math>); direcção e orientação das estrias de superfície sem requisito; processo de fabrico deve contemplar a remoção de material.</p>	
<p>Rugosidade superficial:</p> <p>- Dois limites de especificação, superior unilateral:</p> <p>Para o parâmetro de rugosidade <math>Ra</math>:</p> <p>1) <math>Ra = 1,5 \mu\text{m}</math>; 2) regra dos 16% (padrão), 3) banda de transmissão/comprimento amostral padrão, 4) comprimento de avaliação padrão (<math>5 \times \lambda_c</math>);</p> <p>Para o parâmetro de rugosidade <math>Rz</math>:</p> <p>5) <math>Rz \text{ max} = 6,7 \mu\text{m}</math>, 6) regra do valor máximo, 7) banda de transmissão/comprimento amostral de 2,5 mm, 8) comprimento de avaliação de <math>5 \times 2,5 \text{ mm}</math>.</p> <p>- Direcção das estrias aproximadamente perpendiculares ao plano de projecção da peça;</p> <p>- Processo de fabrico: esmerilamento.</p>	
<p>Rugosidade superficial:</p> <p>- Um único limite de especificação, superior unilateral;</p> <p>- <math>Rz = 1 \mu\text{m}</math>;</p> <p>- Regra dos 16% (padrão);</p> <p>- Banda de transmissão/comprimento amostral padrão;</p> <p>- Comprimento de avaliação padrão (<math>5 \times \lambda_c</math>);</p> <p>- Nenhum requisito para a direcção e orientação das estrias de superfície;</p>	

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tratamento superficial: revestimento de níquel/crómio;</li> <li>- Requisito de acabamento de superfície é válido para todas as superfícies representadas pelo contorno fechado.</li> </ul>	
<p>Acabamento superficial e cotas dimensionais podem ser indicados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Juntos ou numa linha de cota, ou separados na respectiva linha de projecção e linha de cota.</li> </ul> <p>Os três requisitos de rugosidade superficial no exemplo apresentado são todos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Um único limite de especificação, superior unilateral;</li> <li>- Respectivamente: <math>Ra = 1,5 \mu\text{m}</math>, <math>Ra = 6,2 \mu\text{m}</math>, <math>Rz = 50 \mu\text{m}</math>;</li> <li>- Regra dos 16% (padrão);</li> <li>- Comprimento de avaliação padrão (<math>5 \times \lambda_c</math>);</li> <li>- Banda de transmissão/comprimento amostral padrão;</li> <li>- Nenhum requisito para a direcção e orientação das estrias de superfície;</li> <li>- Processo de fabrico requer a remoção de material.</li> </ul>	 <p>The drawing shows a shaft with three steps. The first step has a surface finish symbol <math>Ra 1,5</math>. The second step has a surface finish symbol <math>Ra 6,2</math>. The third step has a surface finish symbol <math>Rz 50</math>. The diameter of the shaft is indicated as <math>\phi 40</math>. The surface finish symbols are placed on the top surface of each step, and the dimension line for the diameter is placed below the shaft.</p>
<p>Indicação de acabamento superficial, dimensionamento e tratamento. O exemplo é ilustrar três sucessivas etapas ou processos de fabrico.</p> <p><b><u>Etapas 1:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Um único limite de especificação, superior unilateral;</li> <li>- <math>Rz = 1,7 \mu\text{m}</math>;</li> <li>- Regra dos 16% (padrão);</li> </ul>	 <p>The drawing shows a shaft with a diameter of <math>\phi 29 \text{ h7}</math> and a length of 50. The surface finish symbol <math>Rz 1,7</math> is placed on the top surface. The treatment symbol <math>\text{Fe/Cr50}</math> is placed above the shaft. The ground symbol <math>\text{ground } Rz 6,5</math> is placed on the top surface of the shaft.</p>

<ul style="list-style-type: none"> <li>- Comprimento de avaliação padrão (5 x <math>\lambda_c</math>);</li> <li>- Banda de transmissão/comprimento amostral padrão;</li> <li>- Nenhum requisito para a direcção e orientação das estrias de superfície;</li> <li>- Processo de fabrico implica a remoção de material.</li> </ul> <p><b><u>Etapa 2:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nenhum requisito de acabamento superficial, com excepção do revestimento em crómio.</li> </ul> <p><b><u>Etapa 3:</u></b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Um único limite de especificação, superior unilateral, válido apenas para a superfície cilíndrica compreendida nos primeiros 50 mm da peça,</li> <li>- <math>R_z = 6,5 \mu\text{m}</math>;</li> <li>- Regra dos 16% (padrão);</li> <li>- Comprimento de avaliação padrão (5 x <math>\lambda_c</math>);</li> <li>- Banda de transmissão/comprimento amostral padrão;</li> <li>- Nenhum requisito para a direcção e orientação das estrias de superfície;</li> <li>- Processo de fabrico: esmerilamento.</li> </ul>	
---	--





## Anexo II – Indicações mínimas para um controlo não ambíguo de funções da superfície

Um requisito de acabamento superficial é constituído a partir de vários elementos de controlo diferentes, que podem ser parte da indicação no desenho técnico ou da indicação em texto, noutros documentos. Os elementos são os seguintes (Figura II.0.1):

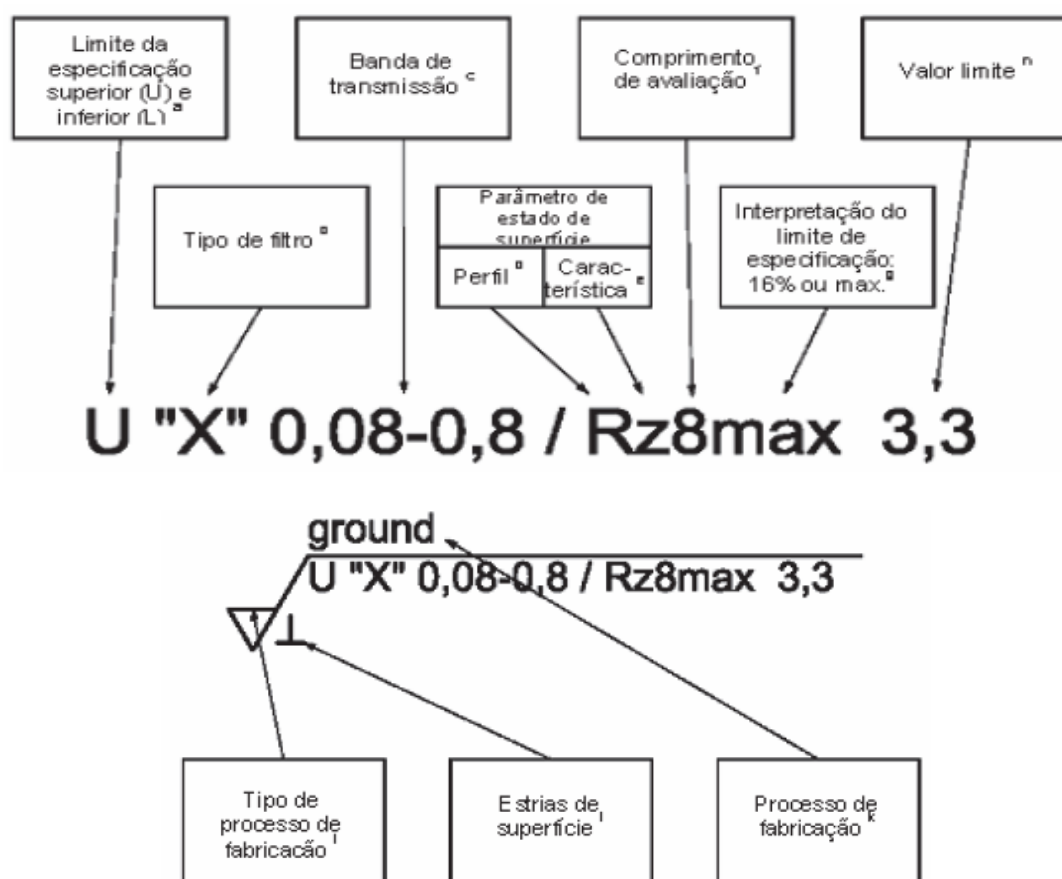


Figura II.0.1 - Elementos de controlo na indicação dos requisitos de acabamentos superficiais em desenhos de engenharia. Figura adaptada de [20].

- a – Indicação do limite de especificação superior (“U”) e inferior (“L”);
- b – Filtro de perfil tipo “X”. O filtro normalizado é o filtro Gaussiano (ISO 11562). O filtro normalizado anterior era o filtro 2RC. No futuro, outros filtros podem ser normalizados. No período de transição, pode ser conveniente para algumas empresas indicar o tipo de filtro nos desenhos técnicos. O tipo de filtro pode ser indicado como “Gaussiano” ou “2RC”. Tal não é normalizado, mas uma indicação do nome do filtro como a aqui proposta é não ambígua;
- c – A banda de transmissão é indicada como filtro de onda-curta e/ou onda-longa;
- d – Tipo de perfil em avaliação (R - Rugosidade, W - Ondulação, P - Perfil primário);

- e – Características/parâmetro;
- f – Comprimento de avaliação expresso em termos do número de comprimentos amostrais. Quando se utilizam parâmetros de motivos, o comprimento de avaliação é indicado entre duas barras oblíquas, antes dos símbolos dos parâmetros de acabamento superficial;
- g – Interpretação do limite de especificação (regra dos 16% ou regra do valor máximo);
- h – Valor limite em micrometros ( $\mu\text{m}$ );
- i – Tipo de processo de fabrico;
- j – Estrias de superfície;
- k – Processo de fabrico.

## Anexo III - Relatório de Ensaios

Instituto Português da **Q**ualidade



GOVERNO DE  
PORTUGAL

MINISTÉRIO DA ECONOMIA

Rua António Gião, 2  
2829-513 CAPARICA Portugal  
Tel. (+351) 212 948 186  
Fax (+351) 212 948 188  
[metrologia@ipq.pt](mailto:metrologia@ipq.pt)  
[www.ipq.pt](http://www.ipq.pt)

# RELATÓRIO DE ENSAIO

NÚMERO 101.40 / 1460006

PÁGINA 121 de 149

### ENTIDADE

NOME	FCT-UNL/UNIDEMI
ENDEREÇO	Faculdade de Ciências e Tecnologia; 2825-516 CAPARICA

### INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO

DESIGNAÇÃO	Amostras de rugosidades de superfícies
MARCA	---
MODELO	---
NÚMERO	---
CONSTITUIÇÃO	Aço: processos de fabrico: fundição; corte por serra e polimento

### CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS

CLASSE DE EXATIDÃO	---
INTERVALO DE INDICAÇÃO	---
RESOLUÇÃO DO DISPOSITIVO AFIXADOR	---

### OPERAÇÃO EFETUADA

TIPO	Estudo dos resultados de medições de rugosidade sobre amostras
DATA	2014-07-14
MÉTODO	Perfilometria por contacto
DOCUMENTO DE REFERÊNCIA	ISO 4287
RASTREABILIDADE METROLÓGICA	Padrão de Rugosidade n/s 731125; IPQ
INCERTEZA EXPANDIDA	Ver páginas seguintes
RESULTADO DE MEDIÇÃO	Ver páginas seguintes

CAPARICA, 8 de agosto de 2014

FERNANDA SARAIVA  
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO  
COMPRIMENTO

ISABEL GODINHO  
DIRETORA de UNIDADE  
LABORATÓRIO NACIONAL DE METROLOGIA

O presente Certificado de Calibração só pode ser reproduzido no seu todo e apenas se refere ao(s) item(s) ensaiado(s).



# RELATÓRIO DE ENSAIO

NÚMERO 101.40 / 1460006

PÁGINA 122 de 149

## Resumo do método:

Resultados para os parâmetros de Rugosidade de acordo com a norma de referência ISO 4287:1997, obtidos nas medições de perfil utilizando o rugosímetro industrial **modelo Surftest SJ-201P da Mitutoyo**, com um raio do *stylus* de 2  $\mu\text{m}$  e amplitude de medição em modo automático. Foram efetuadas medições de perfis para comprimento amostral ( $l_r$ ) e total ( $l_t$ ) de avaliação de  $l_r = 0,8 \text{ mm}$ ,  $l_n = 5 \times l_r = 4 \text{ mm}$ ,  $l_t = 7 \times l_r = 5,6 \text{ mm}$ . O Resultado de Medição corresponde ao valor médio das medições.

## Resultados de medição:

### Superfície obtida por corte por serra:

$l_t$ (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_a)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}^4$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_{max})$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	4,50	1,11	32,74	16,69

### Superfície obtida por fundição:

$l_t$ (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_a)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_{max})$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	8,96	0,95	60,23	16,34

### Superfície obtida por polimento:

$l_t$ (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_a)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_{max})$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	0,04	0,02	0,40	0,16

Resultados de medição, obtidos com o **Rugosímetro Mahr, Modelo Perthometer do IPQ**

## Resumo do método:

Os parâmetros de rugosidade foram avaliados, utilizando um instrumento de medição por contacto (*stylus*), de acordo com as normas ISO 3274:1996 e ISO 4288:1996. Foram efetuadas medições de perfis, com o apalpador RFHTB-250 ( $r = 2 \mu\text{m}$  e amplitude de medição de  $\pm 250 \mu\text{m}$ ) para vários valores de comprimento total, distribuídos sobre a superfície e usando um filtro de Gauss.

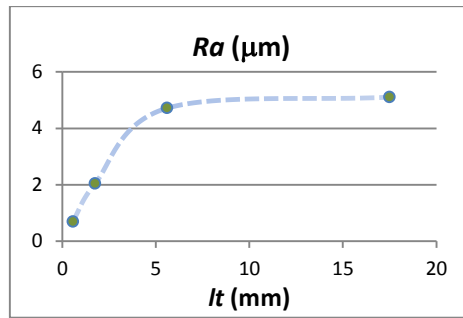
### Superfície obtida por corte por serra:

$l_t$ (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_a)$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )	$U(R_a)$ ( $\mu\text{m}$ )
5,6	4,72	0,81	34,00	8,64

### Resultados em função de $l_t$ :

$l_t$ (mm)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )
0,56	0,69	3,48
1,75	2,04	9,64
5,6	4,72	34
17,5	5,11	40,77

<sup>4</sup> Parâmetro não definido nas normas atualmente em vigor. A norma DIN 4768, que definia o parâmetro de rugosidade  $R_{max}$  e cujo valor nominal é apresentado no padrão foi anulada.



#### Conclusão:

O estudo, realizado a partir da amostra obtida pelo processo de fabrico por corte por serra, permite dizer que, o comprimento total a avaliar para a caracterização da superfície com este tipo de acabamento superficial, deve ser no mínimo de  $l_t = 5,6$  mm, pois do gráfico verifica-se que para  $l_t$  superiores a 5,6 mm o valor de  $R_a$  tende a estabilizar. A especificação de fabrico para este tipo de acabamento de modo a que o parâmetro de Rugosidade  $R_a$  seja independentemente do rugosímetro a utilizar, deverá ser realizada para um  $l_t = 5,6$  mm.

A incerteza expandida apresentada está expressa pela incerteza-padrão multiplicada pelo fator de expansão  $k = 2$ , o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de 95 %, aproximadamente. A incerteza foi calculada de acordo com o documento *Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008 (GUM 1995 with minor corrections)*.

---

FERNANDA SARAIVA  
RESPONSÁVEL DE DOMÍNIO  
COMPRIMENTO